

Prenaponi preneti iz mreže 220 kV na 15,65 kV nivo bloka transformator-generator u HE “Bajina Bašta”

Petar Vukelja, Jovan Mrvić

Elektrotehnički institut “Nikola Tesla”, Koste Glavinića 8a,
11000 Beograd, Srbija

petar.vukelja@ieent.org

Kratak sadržaj: Prikazani su rezultati istraživanja atmosferskih i sklopnih prenapona prenetih iz mreže 220 kV na 15,65 kV nivo bloka transformator-generator u HE “Bajina Bašta”. Analiza rezultata istraživanja je pokazala da preneti prenaponi mogu da ugroze izolaciju 15,65 kV namotaja blok transformatora 242kV/15,65kV i izolaciju namotaja statora generatora. Predloženo je da se za zaštitu izolacije na nivou 15,65 kV postave metaloksidni odvodnici prenapona na pogodnom mestu između šina generatora i uzemljenja.

Ključne reči: prenapon, izolacija, transformator, generator

1. Uvod

Problemima prenošenja prenapona sa višenaponske na niženaponsku stranu blok transformatora Institut “Nikola Tesla” je počeo da se bavi pre više od trideset pet godina. Poznato je da se naponski talasi, bliski onima koji se javljaju pri atmosferskom pražnjenju, ne prenose sa višenaponske na niženaponsku stranu transformatora u skladu sa odnosom preobražaja. Prenose se kapacitivnim i induktivnim putem, ali kapacitivan prenos može biti dominantan. Vrednosti prenetih napona mogu da budu manje, ali i znatno veće (zavisi od konstrukcije namotaja, sprege itd) od vrednosti koje se dobiju deljenjem temene vrednosti naponskih talasa na višenaponskoj strani transformatora sa odnosom njegovog preobražaja. Da bi se ustanovila moguća naprezanja izolacije namotaja blok transformatora i namotaja statora generatora vršena su eksperimentalna istraživanja prenetih napona kroz blok transformatore. Kao izvor naponskih talasa korišćeni su udarni generatori niskih i visokih napona sa kojima su injektirani naponski talasi u visokonaponske priključke blok transformatora, ili u vodove koji dolaze na visokonaponske priključke blok transformatora. Upadni naponski talas (akcija)

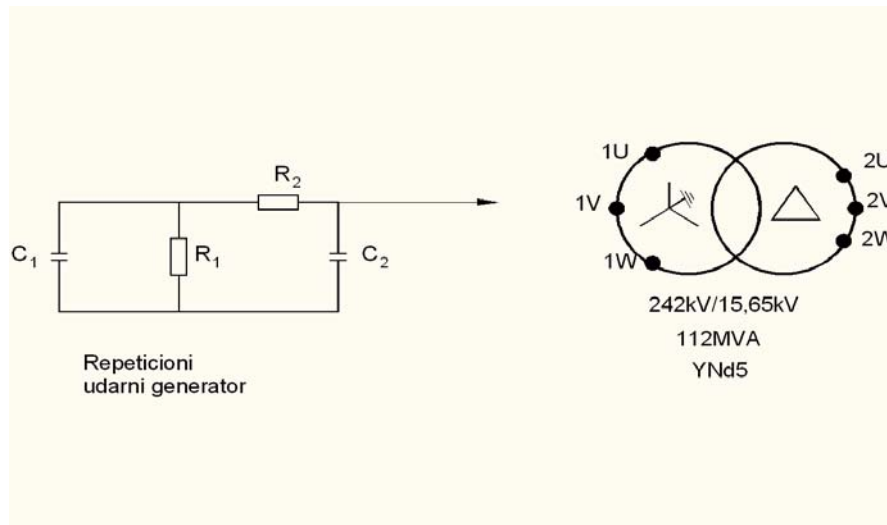
iz udarnog generatora i naponi (odzivi) koji se pojavljuju na priključcima blok transformatora snimani su analognim i digitalnim osciloskopima preko kapacitivnih naponskih mernih sistema urađenih u Institutu "Nikola Tesla", ili preko mešovityh R - C sistema (sondi). Kapacitivni i mešovity R - C naponski merni sistemi verno reprodukuju pojave od nekoliko Hz do 10 MHz. Rezultati eksperimentalnih istraživanja prenetih prenapona poslužili su za procenu ugroženosti izolacije niženaponskih namotaja blok transformatora i izolacije statora generatora. U ovom radu prikazani su rezultati istraživanja prenetih prenapona iz mreže 220 kV na naponski nivo 15,65 kV bloka transformator-generator u HE "Bajina Bašta".

2. Istraživanja i rezultati istraživanja prenetih napona kroz blok transformator 242kV/15,65kV za HE "Bajina Bašta" u fabrici

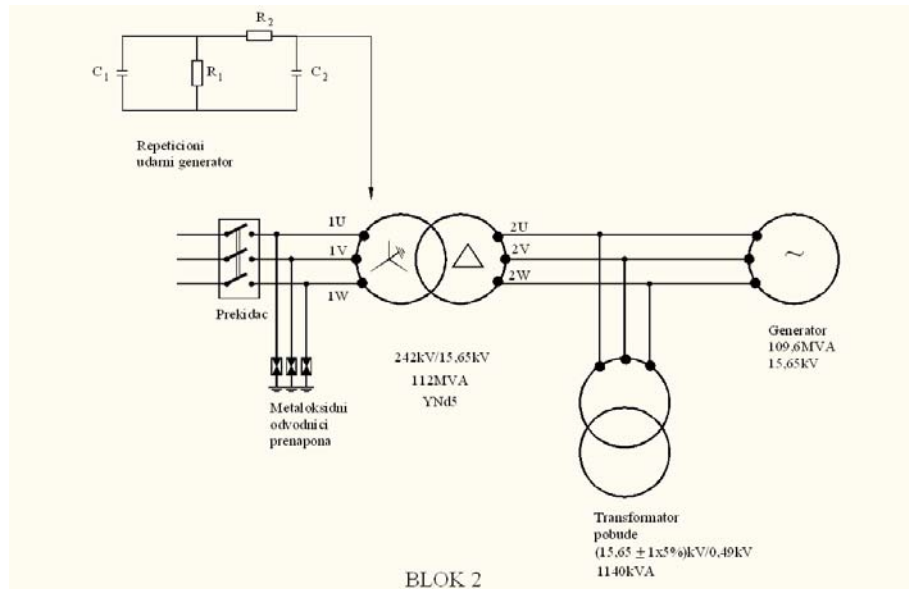
U okviru ispitivanja blok transformatora tip TP-0804-112, 242kV/15,65kV, 112 MVA, sprege YNd5, br.20082474 za blok 2 za HE "Bajina Bašta" u fabrici "ABS Minel transformatori" izvršena su i ispitivanja prenošenja napona sa njegove višenaponske na niženaponsku stranu. Za istraživanja je korišćen repeticioni udarni generator 500 V sa kojim su injektirane akcije u višenaponske priključke transformatora i snimani su akcija i odzivi na niženaponskim priključcima. Šema istraživanja je data na slici 1. U 242 kV priključke su injektirane akcije različitog oblika sa vremenima čela od 0,7 μ s do 300 μ s. Akcije su bile pune i sečene. Sečenje je vršeno neposredno po dostizanju njene temene vrednosti, ili za akcije dužeg trajanja čela, pre dostizanja njene temene vrednosti. Injektiranje akcija je vršeno monofazno (u priključak jedne faze), dvofazno (u priključke dve faze istovremeno) i trofazno (u priključke sve tri faze istovremeno). U šemi na slici 1 su vršena istraživanja kada su na priključcima 242 kV prema zemlji postavljeni otpornici 400 Ω (RU, RV, RW) (otpornici predstavljaju vod karakteristične impedanse 400 Ω kojim naponski talasi dolaze na priključke transformatora). Rezultati istraživanja su pokazali da se na 15,65 kV pojavljuju visoki preneti naponi. Najviši izmereni preneti napon za talase atmosferskog porekla je 33,9 % vrednosti talasa atmosferskog porekla na 242 kV priključcima transformatora. Za talase sklopnog porekla na 242 kV priključcima transformatora najviši preneti napon je 28,5 % njihove vrednosti. Ovako visok kapacitivan prenos napona sa višenaponske na niženaponsku stranu transformatora ukazivao je na mogućnost da njegov namotaj 15,65 kV bude ugrožen od prenapona u eksploataciji. Zato je bilo potrebno da se izvrši istraživanje prenetih napona kroz isti transformator u HE "Bajina Bašta" kada je na njegovoj 15,65 kV strani priključen generator. Između blok transformatora i generatora nema prekidača.

3. Istraživanja i rezultati istraživanja prenetih napona kroz blok transformator 242kV/15,65kV u HE “Bajina Bašta” kada je na strani 15,65 kV priključen generator

Eksperimentalna istraživanja prenetih napona kroz blok transformator 242kV/15,65kV u HE “Bajina Bašta”, kada je na 15,65 kV strani priključen generator, izvršena su repeticionim udarnim generatorom 500 V. Sa njim su injektirane akcije oblika atmosferskih i sklopnih talasa u višenaponske priključke transformatora, slično kao što je urađeno na transformatoru u fabrici. Snimani su akcija na 242 kV priključcima transformatora i odzivi na njegovim 15,65 kV priključcima. Šema istraživanja je data na slici 2. U 242 kV priključke su injektirane akcije različitog oblika sa vremenima čela od 0,7 μ s do 300 μ s. Akcije su bile pune i sečene. Sečenje je vršeno neposredno po dostizanju njene temene vrednosti, ili za akcije dužeg trajanja čela, pre dostizanja njene temene vrednosti. Injektiranje akcija je vršeno monofazno (u priključak jedne faze), dvofazno (u priključke dve faze istovremeno) i trofazno (u priključke sve tri faze istovremeno). U šemi na slici 2 su vršena istraživanja kada su na priključcima 242 kV prema zemlji postavljeni otpornici 400 Ω (šema kada je blok priključen na mrežu 220 kV) i kada su isti skinuti (šema kada je blok isključen sa mreže 220 kV).



Slika 1.



Slika 2.

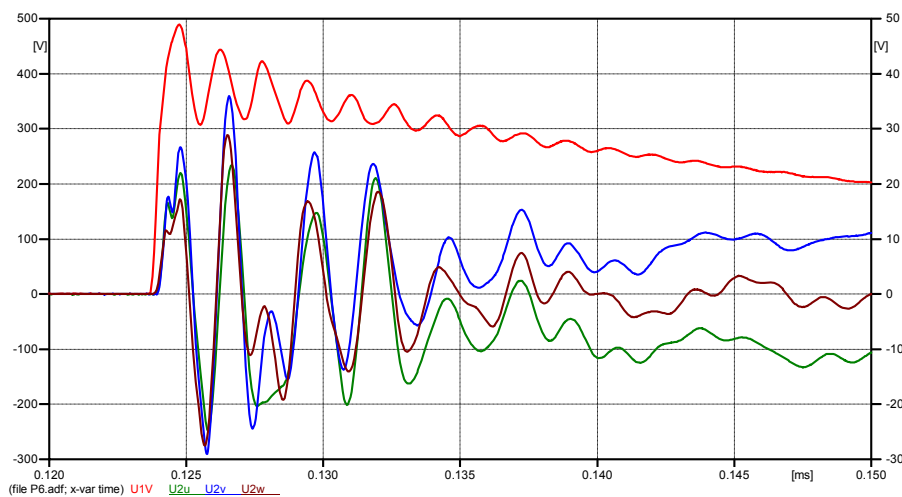
Maksimalne vrednosti prenetih napona na izolaciji 15,65 kV namotaja blok transformatora 242kV/15,65kV i izolaciji namotaja statora generatora dati su u tabelama 1 i 2 u procentima primenjene akcije prema izrazu:

$$n_f = \frac{u_{f,i}}{u_{A,i}} 100[\%] \quad (1)$$

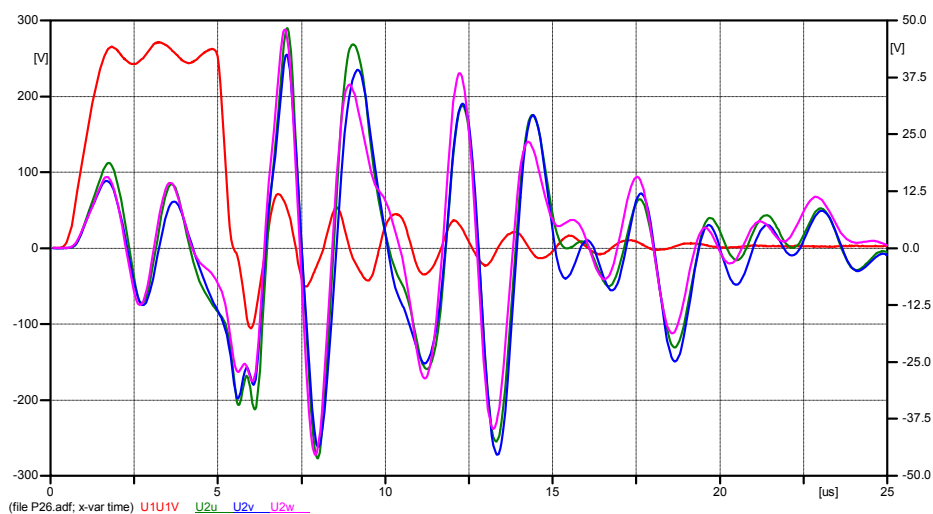
$U_{A,i}$ - izmerena temena vrednost akcije u toku eksperimentalnih istraživanja.

$U_{f,i}$ - izmerena maksimalna vrednost prenetih faznih napona u toku eksperimentalnih istraživanja.

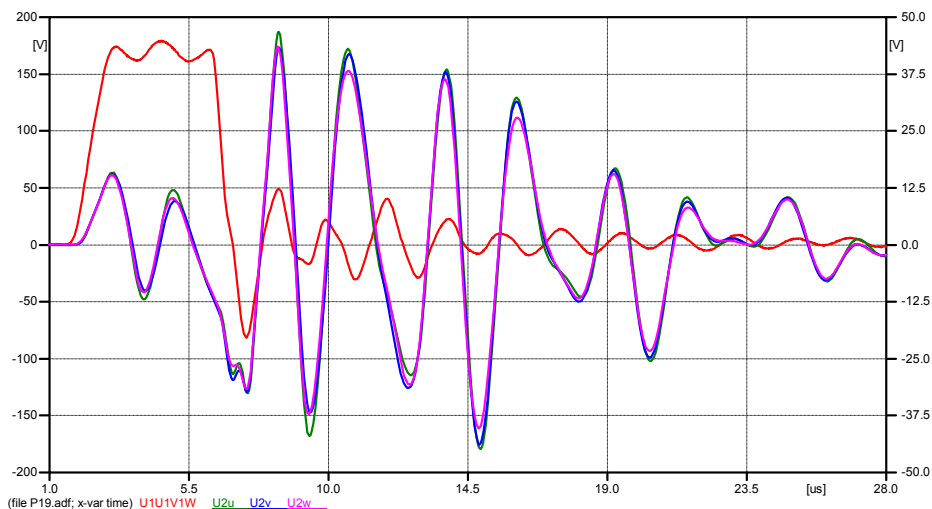
Na slikama 3, 4 i 5 dati su karakteristični snimci akcije i prenetih napona na 15,65 kV strani transformatora 242kV/15,65kV, kada je priključen generator.



Slika 3. Akcija U1V oblika 0,7/16 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ (pun talas, ordinata levo) na 242 kV priključku 1V i preneti naponi U2U, U2V i U2W (ordinata desno) na 15,65 kV strani blok transformatora 242kV/15.65kV kada je priključen generator (šema kada je blok van mreže)



Slika 4. Akcija U1U1V oblika 1,3/57 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ (sečen talas, ordinata levo) na 242 kV priključcima 1U i 1V i preneti naponi U2U, U2V i U2W (ordinata desno) na 15,65 kV strani blok transformatora 242kV/15.65kV kada je priključen generator (šema kada je blok na mreži)



Slika 5. Akcija U1U1V1W oblika 1,3/57 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ (sečen talas, ordinata levo) na 242 kV priključcima 1U, 1V i 1W i preneti naponi U2U, U2V i U2W (ordinata desno) na 15,65 kV strani blok transformatora 242kV/15.65kV kada je priključen generator (šema kada je blok na mreži)

Tabela 1. Maksimalne vrednosti prenetih napona na izolaciji 15,65 kV namotaja blok transformatora 242kV/15,65kV i izolaciji namotaja statora generatora u procentima injektiranih akcija oblika atmosferskih talasa u njihove 242 kV priključke - blok je isključen sa mreže 220 kV

Red. broj	Injektirana akcija u 242 kV priključke transformatra	Oblik akcije ($\mu\text{s}/\mu\text{s}$)	Maksimalne vrednosti prenetih faznih napona na nivou 15,65 kV ($n_{f,2U}$, $n_{f,2V}$, $n_{f,2W}$)		
			$n_{f,2U}$ (%)	$n_{f,2V}$ (%)	$n_{f,2W}$ (%)
1	monofazna	0,7/16 - pun talas	7,3	5,0	5,9
2	monofazna	0,7/1,2 - sečen talas	11,6	10,3	12,6
3	monofazna	1,2/60 - pun talas	3,9	3,2	4,3
4	monofazna	1,1/1,3 - sečen talas	12,0	9,8	12,0
5	dvofazna	1,0/1,0 - sečen talas	18,0	18,5	18,8
6	dvofazna	1,1/55 - pun talas	7,0	6,6	6,2

Red. broj	Injektirana akcija u 242 kV priključke transformatora	Oblik akcije ($\mu\text{s}/\mu\text{s}$)	Maksimalne vrednosti prenetih faznih napona na nivou 15,65 kV ($n_{f,2U}$, $n_{f,2V}$, $n_{f,2W}$)		
			$n_{f,2U}$ (%)	$n_{f,2V}$ (%)	$n_{f,2W}$ (%)
7	dvofazna	6,5/6,5 - sečen talas	17,1	17,0	16,5
8	trofazna	1,0/16 - pun talas	13,0	12,9	11,5
9	trofazna	1,0/1,0 - sečen talas	27,1	26,5	24,8
10	trofazna	1,3/50 - pun talas	8,9	8,7	8,5
11	trofazna	1,3/4,5 - sečen talas	24,9	24,4	24,4

Tabela 2. Maksimalne vrednosti prenetih napona na izolaciji 15,65 kV namotaja blok transformatora 242kV/15,65kV i izolaciji namotaja statora generatora u procentima injektiranih akcija različitog oblika (od atmosferskih do sklopnih) u njihove 242 kV priključke - blok je priključen na mrežu 220 kV

Red. broj	Injektirana akcija u 242 kV priključke	Oblik akcije ($\mu\text{s}/\mu\text{s}$)	Maksimalne vrednosti prenetih faznih napona na nivou 15,65 kV ($n_{f,2U}$, $n_{f,2V}$, $n_{f,2W}$)		
			$n_{f,2U}$ (%)	$n_{f,2V}$ (%)	$n_{f,2W}$ (%)
1	monofazna	0,8/19 - pun talas	5,3	5,1	6,4
2	monofazna	0,8/1,1 - sečen talas	7,9	6,4	6,8
3	monofazna	1,1/60 - pun talas	3,7	2,9	3,9
4	monofazna	1,1/1,5 - sečen talas	10,9	8,6	10,2
5	monofazna	10/500 - pun talas	4,3	1,0	4,5

Red. broj	Injektirana akcija u 242 kV priključke	Oblik akcije ($\mu\text{s}/\mu\text{s}$)	Maksimalne vrednosti prenetih faznih napona na nivou 15,65 kV ($n_{f,2U}$, $n_{f,2V}$, $n_{f,2W}$)		
			$n_{f,2U}$ (%)	$n_{f,2V}$ (%)	$n_{f,2W}$ (%)
6	monofazna	10/10,5-sečen talas	8,2	6,4	8,0
7	monofazna	240/675 - pun talas	2,6	0,1	2,9
8	dvofazna	1/16 pun talas	9,5	9,0	9,6
9	dvofazna	1/1 - sečen talas	17,0	17,5	17,7
10	dvofazna	1,3/57 - pun talas	6,9	6,3	5,8
11	dvofazna	1,3/4,5-sečen talas	17,7	16,6	17,6
12	dvofazna	175/300 - pun talas	0,2	2,9	3,1
13	trofazna	1/15 - pun talas	13,0	12,9	11,7
14	trofazna	1/1 - sečen talas	27,1	26,5	24,8
15	trofazna	1,3/57 - pun talas	8,8	8,7	8,5
16	trofazna	1,3/4,5-sečen talas	24,9	24,4	22,4
17	trofazna	13/140 - pun talas	2,6	2,5	2,6
18	trofazna	10/10 - sečen talas	21,3	21,0	18,9

4. Analiza rezultata istraživanja prenetih napona kroz blok transformator 242kV/15,65kV u HE “Bajina bašta” kada je na strani 15,65 kV priključen generator

Za procenu dielektričnog naprezanja fazne izolacije 15.65 kV namotaja blok transformatora 242kV/15,65kV i izolacije namotaja statora generatora od atmosferskih i sklopnih prenapona potrebno je znati podnosive, odnosno probojne napone njihovih izolacija, kao i karakteristike uređaja koji ih štite od prenapona. Usvojeno je da je probojni napon izolacije 15.65 kV namotaja blok transformatora 242kV/15,65kV za atmosferske talase jednak atmosferskom podnosivom ispitnom naponu 125 kV. Probojni napon izolacije 15,65 kV namotaja blok transformatora za sklopne talase se ne zna. Pretpostavljeno je da je jednak temenoj vrednosti podnosivog ispitnog napona industrijske učestanosti 71 kV ($50 \text{ kV} \times \sqrt{2} = 71 \text{ kV}$).

Podnosivi sklopni i atmosferski naponi izolacije namotaja statora generatora su nepoznati. Zna se samo da se izolacija namotaja statora ispituje sa $(2U + 1\text{kV})$, gde je U - naznačeni napon statora generatora. Iz ovoga proizilazi da je podnosivi sklopni napon jednak ili veći od temene vrednosti ispitnog napona izolacije generatora, a to za generator bloka 2 iznosi $(2 \times 15,65 \text{ kV} + 1 \text{ kV}) \times \sqrt{2} = 45,7 \text{ kV}$. Podnosivi atmosferski napon izolacije statora generatora je veći od vrednosti 45,7 kV. Pošto se ne raspolaže sa podacima o podnosivim atmosferskim i sklopnim naponima izolacije statora generatora, može samo da se usvoji da je na njoj opasna pojava prenapona iznad 45,7 kV.

Transformator 242kV/15,65kV je zaštićen u HE “Bajina Bašta” odvodnicima prenapona na strani 220 kV. To su metaloksidni odvodnici prenapona bez iskrišta tip PEXLIM Q-XH245 proizvodnje ABB naznačenog napona 198 kV, trajnog radnog napona 156 kV. Pretpostavljeno je da će odvodnici prenapona na priključcima 242 kV transformatora ograničiti atmosferske prenapone maksimalno do nivoa njihovog preostalog napona za struju 10 kA (8/20 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$), a on iznosi 466 kV, i da će ograničiti sklopne prenapone do nivoa njihovog preostalog napona za struju 1 kA (30/60 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$), a on iznosi 393 kV.

Procena dielektričnog naprezanja izolacije 15,65 kV namotaja blok transformatora i izolacije namotaja statora generatora izvršena je na sledeći način [1,4]. Najpre je pretpostavljena maksimalna akcija ($U_{T,p}$) koja se može pojaviti na 242 kV priključcima blok transformatora. Za tako pretpostavljenu temenu vrednost akcije maksimalne vrednosti prenetih faznih ($U_{f,p}$) napona na 15.65 kV stranu blok transformatora dobijaju iz sledeće jednačine:

$$U_{T,i} : U_{f,i} = U_{T,p} : U_{f,p} \quad (2)$$

$U_{T,i}$ – izmerena temena vrednost akcije na 242 kV priključcima blok transformatora u toku eksperimentalnih istraživanja.

$U_{f,i}$ – izmerena maksimalna vrednost prenetih faznih napona na 15,65 kV namotaju blok transformatora u toku eksperimentalnih istraživanja.

Dakle, za iznalaženje maksimalnih vrednosti prenetih napona primenjena je metoda linearizacije. Provera ove metode izvršena je ranije na dva energetska transformatora u visokonaponskoj laboratoriji fabrike transformatora u Ripnju. Za proveru metode su korišćeni transformatori 35kV/6,3kV i 110kV/21kV/10,5kV [2,3].

Konstatovano je da preneti naponi na niženaponskoj strani transformatora imaju isti oblik za primenjene akcije istog oblika nezavisno od njihove temene vrednosti. Takođe je konstatovano da između temenih vrednosti akcije i maksimalnih vrednosti prenetih napona postoji linearna zavisnost, nezavisno od visine temene vrednosti primenjene akcije.

Tražene maksimalne vrednosti prenetih faznih napona na izolaciji 15,65 kV namotaja blok transformatora i izolaciji namotaja statora generatora dobijaju se iz jednačine (1):

$$U_{f,p} = \frac{U_{f,i} \cdot U_{T,p}}{U_{T,i}} = \frac{n_{f,i}}{100} U_{T,p} \quad (3)$$

Preneti naponi se superponiraju sa radnim naponom 15,65 kV i tako stvaraju prenaponske talase. Visina prenaponskih talasa, pored visine prenetog napona, zavisi od trenutne vrednosti radnog napona 15,65 kV, a visina prenetog napona zavisi od pretpostavljene akcije. Maksimalna vrednost akcije koja se može pojaviti na 242 kV priključcima blok transformatora može da se kreće u zavisnosti od trenutne vrednosti faznog napona mreže 220 kV i to od $(U_{pn} - U_M \sqrt{2} / \sqrt{3})$ do $(U_{pn} + U_M \sqrt{2} / \sqrt{3})$, gde su U_{pn} – preostali napon metaloksidnog odvodnika prenapona bez iskrišta ($U_{pn} = 466$ kV za atmosferske talase i $U_{pn} = 393$ kV za sklopne talase) i U_M – međufazni napon mreže 220 kV na koju je priključen blok transformatora. Pretpostavljeno je da metaloksidni odvodnici prenapona bez iskrišta na 242 kV priključcima blok transformatora neće propustiti prema namotajima višu vrednost napona od njihovog preostalog napona za atmosferske i sklopne naponske talase, to jest da akcija na 242 kV priključcima, superponovana sa radnim naponom mreže (U_M) u toku jedne njegove periode, može da bude:

$$U_{T,p}(x) < U_{pn} - \frac{U_M \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sin x \quad (4)$$

$$0 \leq x \leq 2\pi$$

Maksimalne vrednosti faznih prenaponskih talasa na nivou 15,65 kV, prema (3) i (4), se dobijaju iz izraza:

$$U_{f,p} = \frac{n_{f,i}}{100} U_{T,p}(x) \quad (5)$$

Pošto je sprega blok transformatora Yd5, prenapon koji može da se pojavi na nivou 15,65 kV predstavlja zbir njegovog naizmeničnog faznog radnog napona $\frac{U_{M,s}}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \sin(x-\theta)$ i prenetog napona definisanog izrazom (5) i iznosi:

$$U_f(x) = \frac{U_{M,s} \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sin(x-\theta) + \frac{n_{f,i}}{100} U_{T,p}(x) \quad (6)$$

$$0 \leq x \leq 2\pi$$

θ ima vrednost $5\pi/6$ ili $\pi/6$ ili $3\pi/2$ u zavisnosti od toga koji se fazni napon posmatra.

Ovde $U_{M,s}$ predstavlja temenu vrednost međufaznog napona 15,65 kV.

Procentualna vrednost $n_{f,i}$ ima predznak "+" ili "-" u zavisnosti od toga kakav polaritet imaju akcije na 242 kV priključcima blok transformatora i preneti naponi na nivou 15,65 kV.

Ako se, usled akcije pozitivnog polariteta na 242 kV priključcima pojavi na nivou 15,65 kV preneti napon pozitivnog polariteta, dolazi znak "+", a ako se pojavi preneti napon negativnog polariteta dolazi znak "-".

Za svako x od 0 do 2π iz jednačine (6) se odbijaju maksimalne vrednosti faznih prenapona na nivou 15,65 kV. Najviši prenapon na nivou 15,65 kV se dobija na sledeći način:

- nalazi se prvi izvod jednačine (6) po "x", izjednačava se sa nulom i nalaze se rešenja x_1 i x_2 ;
- vrednosti x_1 i x_2 se unose u jednačinu (6) i nalaze rešenja $U_f(x_1)$ i $U_f(x_2)$ u kV; najviši fazni prenapon na 15,65 kV namotaju blok transformatora predstavlja rešenje [ili $U_f(x_1)$ ili $U_f(x_2)$] koje ima veću brojnu vrednost, bez obzira da li je predznak "+" ili "-".

Napred navedeno važi kada je blok prisutan u mreži 220 kV.

Kada je blok isključen sa mreže najviše vrednosti prenapona na izolaciji 15,65 kV namotaja transformatora 242kV/15,65kV i izolaciji namotaja statora generatora dobijaju se iz izraza (3). U ovom izrazu $U_{T,p}=U_{pn}$ gde je U_{pn}

vrednost preostalog napona metaloksidnog odvodnika prenapona za atmosferske talase. Sklopni prenapona nema jer blok nije na mreži

Ako su najviši prenaponi na izolaciji 15,65 kV namotaja blok transformatora i izolaciji namotaja statora generatora viši od njihovih izolacionih nivoa (od podnosivih atmosferskih i sklopnih udarnih napona), izolacija može da bude ugrožena, a ako su niži, izolacija nije ugrožena. Na taj način se dobija procena dielektričnog naprezanja izolacije 15,65 kV namotaja blok transformatora i izolacije namotaja statora generatora pri delovanju atmosferskih i sklopnih prenapona.

Koristeći podatke eksperimentalnih istraživanja (Tabela 2), iz izraza (6) ustanovljeni su maksimalni prenaponi koji se mogu pojaviti na izolaciji 15,65 kV za slučaj kada je blok prisutan u mreži 220 kV. Isti su dati u tabeli 3. Kao atmosferski prenaponi tretirani su prenaponi na 242 kV priključcima transformatora 242kV/15,65kV sa vremenom čela do nekoliko μ s, a sklopni su sa vremenom čela većim od nekoliko μ s.

Koristeći podatke eksperimentalnih istraživanja (Tabela 1), iz izraza (3) ustanovljeni su maksimalni prenaponi koji se mogu pojaviti na izolaciji 15,65 kV za slučaj kada je blok isključen sa mreže 220 kV. Isti su dati u tabeli 4

Iz tabela 3 i 4 se vidi da su vrednosti maksimalnih mogućih prenetih prenapona na 15,65 kV strani transformatora 242kV/15,65kV u pojedinim slučajevima više od pretpostavljenih izolacionih nivoa 15,65 kV namotaja. Iz istih tabela se vidi da su preneti naponi u većini slučajeva viši od pretpostavljenih izolacionih nivoa namotaja statora generatora.

Ako se uporede rezultati istraživanja prenetih napona kroz transformator 242kV/15,65kV izvršenih u fabrici "ABS Minel transformatori" sa rezultatima istraživanja prenetih napona u HE "Bajina Bašta" kada je priključen generator, uočava se da su prenaponi u prisustvu generatora znatno niži. Prisustvo generatora je umanjilo visinu prenetih napona na nivou 15,65 kV, ali ne i dovoljno da bi namotaj 15,65 kV transformatora 242kV/15,65kV bio potpuno zaštićen. Međutim, pokazalo se da je od prenetih prenapona ugrožena izolacija namotaja statora generatora za pretpostavljeni podnosivi nivo izolacije 45,75 kV.

Tabela 3. Maksimalne vrednosti prenapona na izolaciji 15,65 kV namotaja transformatora 242kV/15,65kV i izolaciji namotaja statora generatora pri dolasku atmosferskih i sklopnih prenapona na 242 kV priključke transformatora – blok je priključen na mrežu 220 kV

Dolazak atmosferskih i sklopnih prenapona na 242 kV priključke transformatora 242kV/15,65kV		Maksimalne vrednosti prenapona na izolaciji 15,65 kV (kV)
Dolazak atmosferskih prenapona po jednoj fazi	bez preskoka na izolaciji	50
	sa preskokom na izolaciji	80
Dolazak atmosferskih prenapona po dve faze	bez preskoka na izolaciji	64
	sa preskokom na izolaciji	120
Dolazak atmosferskih prenapona po tri faze	bez preskoka na izolaciji	90
	sa preskokom na izolaciji	185
Dolazak sklopnih prenapona po jednoj fazi	bez preskoka na izolaciji	35
	sa preskokom na izolaciji	70
Dolazak sklopnih prenapona po dve faze	bez preskoka na izolaciji	30
	sa preskokom na izolaciji	-
Dolazak sklopnih prenapona po tri faze	bez preskoka na izolaciji	25
	sa preskokom na izolaciji	130

Tabela 4 Maksimalne vrednosti prenapona na izolaciji 15,65 kV namotaja transformatora 242kV/15,65kV i izolaciji namotaja statora generatora pri atmosferskom pražnjenju u 242 kV priključke transformatora - blok je isključen sa mreže 220 kV

Atmosferska pražnjenja u 242 kV priključke transformatora 242kV/15,65kV		Maksimalne vrednosti prenapona na izolaciji 15,65 kV (kV)
Atmosferska pražnjenja u jednu fazu	bez preskoka na izolaciji	34
	sa preskokom na izolaciji	59
Atmosferska pražnjenja u dve faze	bez preskoka na izolaciji	48
	sa preskokom na izolaciji	88
Atmosferska pražnjenja u tri faze	bez preskoka na izolaciji	61
	sa preskokom na izolaciji	126

Napred izloženi deterministički postupak, za procenu ugroženosti izolacije 15,65 kV namotaja blok transformatora i namotaja statora generatora pri delovanju atmosferskih i sklopnih prenapona, ne omogućava da se dobije potpuna slika o tome. Utvrđuju se samo maksimalne vrednosti prenapona za teorijski najnepovoljnije slučajeve pojave prenapona na 242 kV priključcima transformatora 242kV/15,65kV. Ne razmatraju se verovatnoće pojave pretpostavljenih teorijskih najnepovoljnijih prenapona atmosferskog i sklopnog porekla. Za tačniju procenu potrebno je utvrditi parametre pouzdanosti rada transformatora i generatora pri delovanju atmosferskih i sklopnih prenapona u HE "Bajina Bašta", na mestima gde su smešteni. A to znači da treba utvrditi skupove prenapona na priključcima blok transformatora i priključcima namotaja statora generatora pri atmosferskom pražnjenju i sklopnim operacijama, na osnovu njih rizike proboja izolacija 15,75 kV namotaja i namotaja statora generatora, pa očekivane godišnje brojeve proboja i na kraju prosečne intervale vremena između dva uzastopna proboja izolacija. Međutim, utvrđivanje takvih skupova prenapona je obiman posao i zahteva ozbiljan studijski rad.

Deterministički postupak, baziran na najtežim teorijski mogućim pojavama prenapona na izolaciji 15,65 kV namotaja blok transformatora i namotaja statora generatora, ukazao je da su moguća oštećenja izolacije od prenapona i to dominantno od prenapona koji nastaju pri preskoku na izolaciji i kao takvi dolaze na 242 kV priključke transformatora. Ovakvi preskoci na izolaciji su mogući pri atmosferskim pražnjenjima u samo postrojenje 220 kV u HE "Bajina Bašta", ili pri atmosferskim pražnjenjima u vodove 220 kV na ulasku

u postrojenje. Iz tabele 4 se vidi da čak i kada blok nije na mreži, atmosferska pražnjenja u 242 kV priključke transformatora mogu da dovedu do prenapona na nivou 15,65 kV i ugroze izolaciju namotaja statora generatora. Međutim, veoma je mala verovatnoća da dođe do prodora groma kroz gromobransku zaštitu HE "Bajina Bašta" i da isti pogodi visokonaponske priključke transformatora.

Iz tabele 3 se vidi da sklopni prenaponi pri preskoku na izolaciji 220 kV mogu da dovedu do prenapona na nivou 15,65 kV i ugroze izolaciju namotaja statora generatora. Malo je verovatno da dođe do preskoka na izolaciji usled sklopnih prenapona. Pri manipulacijama prekidača 220 kV ne očekuje se pojava tako visokih prenapona koji bi mogli da izazovu preskok na izolaciji postrojenja 220 kV u HE "Bajina Bašta".

Potrebno je konstatovati da je u analizi uzeto da je nivo zaštite metaloksidnim odvodnicima prenapona određen njihovim preostalim naponima za atmosferske talase $U_{pn} = 466$ kV i za sklopne talase $U_{pn} = 393$ kV. Ovi odvodnici nemaju iskrišta i njihovo delovanje na smanjenju prenapona počinje znatno ranije nego što su vrenosti njihovih napred navedenih preostalih napona. To znači da su ustanovljene vrednosti prenetih napona nešto niže nego što su utvrđene proračunom.

Na osnovu prethodnih razmatranja ipak se mora konstatovati da postoji mogućnost da pojava atmosferskih prenapona u postrojenju 220 kV u HE "Bajina Bašta" dovede do prenapona na nivou 15,65 kV koji mogu biti opasni za izolaciju namotaja statora generatora. Bez ozbiljnijeg studijskog razmatranja ne može se proceniti kolika je verovatnoća takvih događaja. I za tako razmatranje potrebno je raspolagati najvažnijim podatkom, a to je vrednost podnosivog atmosferskog napona izolacije namotaja statora generatora.

Bilo bi poželjno da se zaštiti izolacija namotaja statora generatora od mogućih prenapona. Postavljanje metaloksidnih odvodnika prenapona bez iskrišta između šinskih veza 15,65 kV generatora i uzemljivača, ako je izvodljivo, ograničilo bi prenapone na nivo koji nije opasan za izolaciju namotaja statora generatora.

Iskrišta na provodnim izolatorima 220 kV nisu potrebna jer su metaloksidni odvodnici prenapona na kratkom rastojanju od provodnih izolatora transformatora i ograničavaju prenapone znatno ispod nivoa napona na kojeg iskrišta treba da reaguju. Kada bi se zaista desilo da dođe do reagovanja ovih iskrišta (nemoguće je kada su metaloksidni odvodnici prenapona ispravni), nastali veoma strmi prenaponi bi bili opasni za izolaciju namotaja transformatora i izolaciju namotaja statora generatora. Iskrišta na provodnim izolatorima 15,65 kV nisu poželjna. Njihovim reagovanjem veoma strmi prenaponski talasi bi ulazili u namotaje statora generatora i namotaje 15,65 kV blok transformatora 242kV/15,65kV i mogli bi iste da oštete.

5. Zaključci

Analiza rezultata istraživanja prenapona na nivou 15,65 kV, koji se mogu preneti kroz transformator 242kV/15,65kV bloka 2 iz mreže 220 kV, je pokazala da postoji mogućnost da oštete izolaciju namotaja statora generatora. Poželjno bi bilo da se za zaštitu izolacije namotaja statora generatora, ako je izvodljivo, postave metaloksidni odvodnici prenapona bez iskrišta na pogodnom mestu između šinskih veza 15,65 kV generatora i uzemljivača. Pošto je transformator bloka 1 isti kao transformator bloka 2, rezultati istraživanja prenetih napona bi bili slični. Zato je poželjno, kao i za blok 2, da se postave metaloksidni odvodnici prenapona bez iskrišta na pogodnom mestu između šinskih veza 15,65 kV generatora i uzemljivača. Montiranje odvodnika treba izvesti tako da se pri radu generatora može prići njihovim zemljovodima radi periodične kontrole njihovog stanja mereći struju odvoda.

Neophodna je periodična kontrola metaloksidnih odvodnika prenapona na 242 kV strani transformatora bloka 1 i bloka 2.

Iskrišta na provodnim izolatorima na 15,65 kV strani transformatora 242kV/15,65kV bloka 1 i bloka 2 je potrebno demontirati. Poželjno je skinuti i iskrišta na provodnim izolatorima na 242 kV strani transformatora bloka 1 i bloka 2.

Literatura

- [1] P. Vukelja i drugi: "Problematika zaštite tercijera energetskih transformatora ZEP-a sa stanovišta pojave prenapona", Studija br.383V12, Elektrotehnički institut "N.Tesla", Beograd 1983.god., str.170.
- [2] P. Vukelja, M. Vučinić, A. Janković: "Prenošenje napona iz jednog u drugi naponski nivo transformatora – uporedna istraživanja visokim i niskim udarnim naponima", XIV savetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, R33.10, Sarajevo, 14-19 maj, 1979, 127-135.
- [3] P. Vukelja, M. Vučinić: "Uporedna eksperimentalna analiza prenošenja napona kod transformatora delovanjem niskih i vrlo visokih napona", XV savetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, 112.12, Beograd, 19-22 april, 1981, 161-172.
- [4] Z. Zdravković, P. Vukelja: "Koordinacija izolacije postrojenja i sistema visokonaponskih objekata", Studija br. 319703, Institut "N.Tesla", Beograd 1997, str.273.
- [5] "Ispitivanje napona prenetih sa višenaponske na niženaponsku stranu transformatora 242kV/15,65kV proizvođača ABS MINEL TRANSFORMATORI", Izveštaj Instituta br. 311106, 2011 god.

- [6] "Preneti prenaponi kroz blok transformator 242kV/15,65kV u HE "Bajina Bašta" pri delovanju atmosferskih i sklopnih prenapona", Izveštaj Instituta br. 311112, 2011 god.

Abstract: The paper presents the results of research in lightning surge waves and switching overvoltages transferred from a network of 220 kV to the 15.65 kV level of the step-up transformer in HPP "Bajina Bašta". Analysis of survey results lead to conclusion that transferred overvoltages can endanger 15.65 kV transformer windings and stator winding insulation. It was therefore suggested for the protection of the 15.65 kV isolation to install metal oxide surge arresters at a suitable place between the power generator bus bars and earthing

Key words: overvoltages, insulation, transformer, generator

Overvoltages Transferred from a Network of 220 kV to 15.65 kV Level of the Step-up Transformer in HPP "Bajina Bašta"

Rad primljen u uredništvo 10.09.2011. godine
Rad prihvaćen 16.10.2011. godine