

Marijan Kalea

TS 220/110 kV Đakovo, prva kompenzacija pri naponu od 110 kV u Hrvatskoj

Sažetak: Postrojenje za kompenzaciju jalove energije pri naponu od 110 kV u TS 220/110 kV Đakovo službeno je pušteno u pogon 21. studenog 1997. To je postrojenje bilo od velikog značaja za opskrbu električnom energijom Slavonije i Baranje u poratnim prilikama, u kvalitativnom i kvantitativnom smislu, čija je uloga osvjedočena već u zimi 1997./1998. godine. Napon priključka 110 kV, primjena prekidača za sinkrono sklapanje po polovima i primjena prigušnica u faznim granama serijski spojenih s kompenzatorskim kondenzatorima – čime je ostvarena i njihova filtarska uloga prema višim harmonicima u mreži – obilježja su prema kojima se to postrojenje pionirski izdvaja od dotad ostvarenih kompenzacija jalove energije u prijenosnoj mreži Hrvatske elektroprivrede.

Ključne riječi: TS 220/110 kV Đakovo, kompenzacija jalove snage, filtri viših harmonika u elektroenergetskoj mreži

Uvod – slijed događaja

TS 220/110 kV Đakovo u pogonu je od 1967., a nakon samo godinu dana pogona dogodila se teška havarija u kojoj je potpuno uništeno korišteno kompenzacijsko postrojenje sa sinkronim kompenzatorom 30 Mvar. Godine 1977. Slavonija i Baranja uključene su u mrežu 400 kV, vodovima od 400 kV snažno poduprtim elektranama te je prestala neposredna potreba kapacitivne kom-

penzacije. Štoviše, pogonske poteškoće s previsokim naponom morale su biti svladavane umjetnim induktivnim jalovim opterećenjem, prigušnicama od čak 2×50 Mvar ugrađenim u TS 400/110 kV *Ernestinovo*, priključenim na tercijarne transformatora pod naponom od 30 kV.

U ratnim razaranjima 1991./1992. položaj slavonsko-baranjske prijenosne mreže bitno je pogoršan. Nastalo stanje prijenosne mreže obilježava činjenica da su brojni dalekovodi i transformatorske stanice na rubu slobodnog područja u Osijeku, Vinkovcima, Županji i Slavanskom Brodu u ratnim razaranjima 1991./1992. devastirani te je njihovo korištenje otežano i suženo. Najteži je bio potpuni gubitak TS 400/110 kV *Ernestinovo*, koji se zbio u studenom 1991. godine. Prijenosna mreža u hrvatskom Podunavlju bila je na privremeno okupiranom području, pod nadzorom Prijelazne administracije Ujedinjenih naroda (*UN Transitional Administration in Eastern Slavonia, Baranja and Western Sirmium* – UNTAES), a tek je 15. siječnja 1998. ostvarena potpuna nadležnost Hrvatske elektroprivrede nad elektroenergetskim objektima na tom području.

Dobava električne energije ostvarivala se vodom nazivnog napona 400 kV, pod pogonskim naponom od 220 kV, iz središnjeg dijela elektroenergetskog sustava (TS 220/110 kV Mraclin), dugim oko 235 kilometara. Na njegovu kraju priključena je radialno TS 220/110 kV Đakovo, a oko 35 kilometara ispred kraja priključena je privremena 220/110 kilovoltna transformacija “1505/2” snage 150 MVA. Kapacitet dobave tim vodom je nešto preko 200 MW, iskušano u pogonu, uz povlačenje preko 100 Mvar iz napojnog čvorišta. Dobava je pripomognuta i vodovima od 110 kV Virovitica – Slatina, Siklós – Valpovo i Nova Gradiška – Požega, dva zadnja voda od 1995. godine. Ne u isto vrijeme, svaki od tih vodova bivao je rubno opterećen s oko 45 MW, s tim da se vod od 110 kV Siklós – Valpovo koristi otočnim pogonom odgovarajućeg izdvojenog dijela hrvatske mreže.

U Slavoniji je jedna javna elektrana, TE-TO Osijek, ukupne snage 90 MW, uključivo i snagu agregata PTE od kojih je jedan od 23 MW u ratu potpuno razoren, a obnovljen 1993. godine. Industrijske elektrane u Osijeku, Županji i Belišću angažiraju se s neznatnim plasmanom u mrežu. Interventna elektrana u Slavanskom Brodu i dizelske elektrane imale su ukupnu snagu od oko 45 MW i bile su priključene na sredjonaponsku mrežu 1996./1997. godine.

Uz tadašnji, i dulje vremena saglediv, radialni priključak Slavonije na elektroenergetski sustav, sva se jalova snaga mora transportirati radialnim, do krajnjih mogućnosti opterećenim vodom od 220 kV, što znači:

- povećanu struju u odnosu na onu koja bi bila potrebna za namirenje potražnje samo djelatne snage
- povećane gubitke energije na tom vodu
- lošije naponske prilike na njegovu kraju, posebno ako su izvan pogona svi agregati TE-TO Osijek.

Tijekom 1997. i dalje je potpuno izvan pogona sedam dalekovoda predratne mreže od 110 kV (ukupne duljine 86 km), kao i potpuno razorena i opljačkana TS 400/110 kV *Ernestinovo*, a osam dalekovoda od 110 kV koristi se na dijelu trase pod višim odnosno nižim naponom od konstrukcijskog (220 kV, 110 kV, 35 kV i 10 kV), pa je izvan pogona još ukupno 75 km. I dalje su u punom i nezamijenjenom korištenju sve dionice privremenih vodova na drvenim stupovima (40 kilometara) s privremenim transformacijama 110/35 kV "505", 22 MVA i TS 220/110 kV "1505/2", 150 MVA. Na trasama pet vodova koji se koriste u mreži još uvijek postoje minirane dionice.

Prijenosna mreža praktički je na trećini predratnog kapaciteta. Potražnja za električnom energijom veća je od 3/4 predratne, a u zimi 1997./1998. očekivao se još značajniji porast (konačni povrat hrvatskog Podunavlja!).

1. Potrebna jalova snaga

Potražnja Slavonije i Baranje, relativno stabilizirana u nekoliko prijeratnih godina (1989./1990.), omeđena je graničnim vrijednostima:

- maksimalno djelatno / jalovo opterećenje 350 MW/125 Mvar
- minimalno djelatno / jalovo opterećenje 105 MW/50 Mvar.

Potražnja jalove snage iskazana je na razini 110 kV, dakle u njoj su sadržani gubici jalove snage mreže 110 kV, transformatora 110/35 kV, te izravnih potrošača i sva potražnja mreže i potrošača na niženaponskim razinama. Nisu sadržani gubici jalove snage u transformatorima 220/110 kV i prijenosnim vodovima 220 i 110 kV do Slavonije.

Već ujesen 1992. razmatrana je i idejno projektirana mogućnost hitne ugradnje kompenzacije jalove snage u TS 220/110 kV Đakovo, radi pripreme za budući dugotrajniji radijalni pogon (koji se tako i ostvario, sve do 2004. kad je priključena obnovljena TS 400/110 kV *Ernestinovo* na pogonski napon 400 kV te pušteni u pogon svi dalekovodi 400 kV i 110 kV koji su priključeni na tu trafostanicu). Studijom Instituta za elektroprivredu i energetiku – Zagreb dovršenom 1993. godine utvrđena je opravdanost kompenzacije od 100 Mvar pri maksimalnom opterećenju.

Ujesen 1993. razmatrana je opravdanost da se ukupno potrebna kompenzacija u Slavoniji i Baranji razdijeli na sustavnu i distribuiranu kompenzaciju te je zaključeno da se 50 Mvar instalira kao sustavna kompenzacija u TS 220/110 kV Đakovo, a 50 Mvar kompenzacije razdijeli u više čvorišta distribucijske, srednjonaponske mreže (kako je i ostvareno).

Pretprojektom Elektroprojekta – Zagreb, dovršenim 1994. godine, utvrđeno je da je sustavnu kompenzaciju najbolje priključiti na naponsku razinu od 110 kV u TS 220/110 kV Đakovo, što je prvo takvo rješenje u Hrvatskoj pri

visokom naponu. Dotad su kompenzacijski uređaji priključivani na srednji i niski napon.

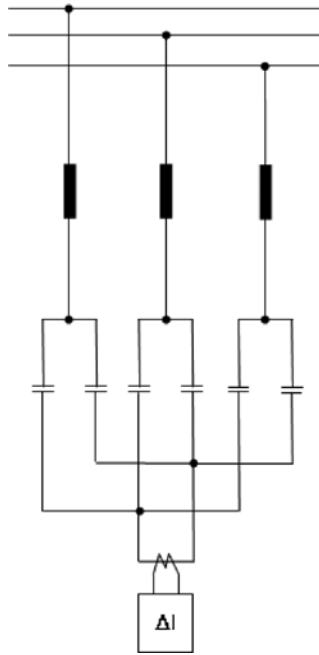
2. Rješenje sustavne kompenzacije

U javnom nadmetanju poznatih europskih tvrtki za isporuku sustavne kompenzacije, Hrvatska elektroprivreda izabrala je tvrtku ABB iz Ludvike, Švedska. Oblikovanje rješenja obavljeno je na temelju mjerenja u mreži, obavljenih 1994. godine, kojima su utvrđeni udjeli viših harmonika osnovne frekvencije struje i napona od 50 Hz u mreži. Najistaknutiji je bio peti harmonik (250 Hz), pa treći (150 Hz) i potom sedmi (350 Hz). Ostali neparni harmonici, kao i svi parni, bili su znatno nižih udjela. Spomenimo da je pojava viših harmonika napona u mreži uvjetovana sve većim korištenjem suvremenih, a nelinearnih trošila (čiji priključak na sinusni napon rezultira strujom osnovnog, ali i viših harmonika) te sa stupnjem svekolikog razvoja rastu teškoće u mreži izazvane višim harmonicima.

Cjelokupni kompenzacijski slog priključuje se jednim prekidačem za sinkrono sklapanje po polovima na sabirnice od 110 kV u TS 220/110 kV Đakovo i dijeli se u tri filtarsko-kompenzacijske grane od po 16 Mvar. Svaka grana može se rastavljačem izdvojiti iz pogona te se može ostvariti stupnjevita kompenzacija od 0-18-36-48 Mvar, usklađeno s potražnjom u pojedinim dnevnim i sezonskim razdobljima.

Pojedina filtarsko-kompenzacijska grana sadrži kondenzatorsku bateriju odgovarajućeg kapaciteta i prigušnicu bez željeza (kako bi joj permeabilitet i time induktivitet bio stalan), tako da je rezonantna frekvencija pojedine grane oko trećeg, petog i sedmog harmonika osnovne frekvencije mreže; nazivno 150 Hz, 250 Hz i 350 Hz. Time su ostvareni filtri za te više harmonijske članove struje i napona u mreži. Osim osnovne uloge u mreži – kompenzacija javlove snage na kraju dugog radijalnog voda od 220 kV (duljine 235 km), radi omogućenja njegova djelatnog opterećenja uz povoljnije prilike – rješenje osigurava i smanjenje zatečene naponske distorzije u mreži, svojom filtarskom ulogom.

Prekidač sa sinkronim sklapanjem po polovima funkcionira tako da izvršenje isklopa čeka najraniji dolazak faznog napona na nulu i tad se prosljeđuje nalog za iskop tog pola, a nalog za istodobni iskop preostalih dvaju polova prosljeđuje se odmah nakon što linijski napon među tim dvjema fazama prolazi kroz nulu. Dakle, uklapa i isklapa kompenzaciju u najpovoljnijem trenutku napona u pojedinim fazama i snižava udarnu struju, koja je neugodnija kod uklopa. Svime upravlja relej za sinkrono sklapanje, a nalog za iskop zaštitom prosljeđuje se bez čekanja najpovoljnijeg trenutka.



Slika 1.: Tropolna shema jednog kompenzacijskog filtra

Na tropolnoj shemi prikazan je jedan od triju shematski jednakih filtara (pojedini filtri imaju različite parametre svojih komponenata). Kondenzatori u faznim granama priključeni su u dvije poluzvijezde s izoliranim zvjezdištima (od zemlje). Ta zvjezdišta međusobno su povezana primarom strujnog mjernog transformatora koji napaja diferencijalni nadstrujni relej. Ako su sve grane u svim trima zvjezdama potpuno simetrične, nema diferencijalne struje. Njezina pojava znak je da je neka u nizu paralelno spojenih kondenzatorskih jedinica probila, što signalizacijom (manja struja) ili čak nalogom za isklon (veća struja) upozorava na proboj. Svaka kondenzatorska jedinica sadrži rastalni osigurač koji izdvaja probijenu jedinicu, a ako ih je više, dolazi do isklona i neodgodiva je zamjena ispravnim jedinicama.

Kompenzacija u TS 220/110 kV Đakovo koristit će se u skladu s prilikama u mreži: trenutačnim uklopnim stanjem mreže i stvarnim postignutim opterećenjem. Najviše će doći do izražaja u razdobljima najvećih opterećenja, a u nekim razdobljima i pri nekim opterećenjima angažirat će se samo pojedini stupnjevi kompenzacije ili će čak biti potpuno isključena.

Tijekom duljeg predstojećeg razdoblja, prilike u mreži mijenjat će se promjenom topologije te dogradnjom elektrane ili elektrana na području istočne Hrvatske. U potpuno uzamčenoj i višestruko povezanoj superponiranoj mreži (kakva je bila prije ratnih razaranja 1991./1992. godine i opet će biti nakon

obnove TS 400/110 kV *Ernestinovo*), moguće je da u većini tadašnjih prilika kompenzaciju neće biti potrebno angažirati. Koristit će se kao rezervni izvor jalove snage za uvijek moguće slučajeve radijalnog pogona slavonske mreže ili će biti premještena na potrebnije mjesto u mreži Hrvatske.

3. Izgradnja sustavne kompenzacije

Ugovor o isporuci opreme za sustavnu kompenzaciju zaključen je s tvrtkom ABB krajem 1994. Ugovor o glavnom projektu zaključen je s tvrtkom Elektroprojekt – Zagreb sredinom 1994., a aneks sredinom 1995. godine.

Građevinski radovi počeli su u studenom 1995., a izvelo ih je poduzeće Rad – Đakovo. Elektromontažni radovi počeli su u prosincu 1996., a izvelo ih je poduzeće Dalekovod – Zagreb uz podizvođača Tehnoelektro – Đakovo. Probni pogon počeo je krajem listopada 1997. i otad postrojenje funkcionira sukladno očekivanim obilježjima te je znatno poboljšalo otežane elektroenergetske okolnosti u središnjem čvorištu opskrbe Slavonije i Baranje iz elektroenergetskog sustava Hrvatske.

Ukupna vrijednost ugrađene opreme te građevinskih i elektromontažnih radova bila je 8,8 milijuna kuna, a ta znatna sredstva opravdava:

- namirenje potražnje jalove energije u središtu potražnje i time oslobađanje radijalno priključenog prijenosnog voda za povećani prijenos djelatne energije
- sniženje gubitaka električne energije na tomvodu
- sniženje opterećenja elektrana u sustavu proizvodnjom jalove energije
- poboljšanje naponskih okolnosti u razdobljima najveće potražnje
- povećanje kvalitete napona filtarskom ulogom.

Zanimljivo je dodati kako se puštanje u pogon (1997.) sustavne kompenzacije *poklopilo* s tridesetom obljetnicom puštanja u pogon TS 220/110 kV Đakovo (1967.). To je bio središnji opskrbeni objekt prijenosne mreže u Slavoniji i Baranji do puštanja u pogon TS 400/110 kV *Ernestinovo* (1977.), a središnju ulogu ponovno mu je nametnuo rat na dugih 14 godina.

4. Korištenje sustavne kompenzacije u TS 220/110 kV Đakovo

Sustavna kompenzacija korištena je u razdoblju 1997. do 2006. godine. Kako je 2004. godine puštena u pogon obnovljena TS 400/110 kV *Ernestinovo* pod naponom od 400 kV, prestala je potreba za kapacitivnom kompenzacijom

u slavonsko-baranjskoj prijenosnoj mreži. Štoviše, javlja se ponovno potreba za umjetnim induktivnim opterećenjem u čvorištu 400 kV *Ernestinovo* te je u tu svrhu u nju ugrađena prigušnica od 100 Mvar, priključena na sabirnice od 110 kV.

Prvih je godina pogona kompenzacije ostvarivana proizvodnja jalove energije od oko 100 Gvarh, da bi zadnje dvije godine (2005. i 2006.) bila ostvarena neznatna proizvodnja. Nakon toga kompenzacija u TS Đakovo nije više korištena. Najveća godišnja proizvodnja jalove energije ostvarena je 2004. godine, oko 400 Gvarh, dakle, ostvareno godišnje trajanje ukupne instalirane snage kompenzacije bilo je više od 4400 sati, što je još jedan pokazatelj kako je obnova TS *Ernestinovo* dovršena doista u zadnji čas. Već 2004. ostvareno je induktivno jalovo opterećenje prigušnicom u TS *Ernestinovo* od preko 100 Mvar, a 2016. godine ostvareno je čak više od 700 Mvarh.

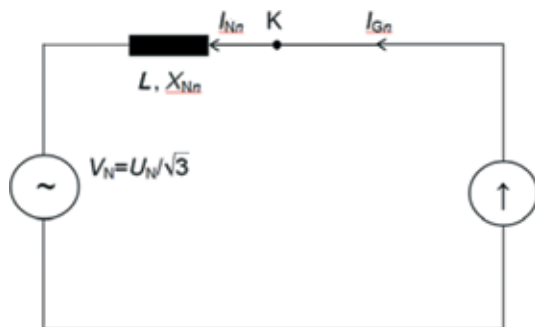


Slika 2.: Postrojenje sustavne kompenzacije od 110 kV, 48 Mvar, u TS 220/110 kV Đakovo

PRILOG: Kratko tumačenje filtarske kompenzacije

1. Prilike u mreži prije priključka kompenzacije

Promatramo jednu granu trofazne mreže, spojene u zvijezdu, samo s reaktancijama (bez djelatnog otpora), slika 1. Izvan promatranja je struja osnovnog harmonika koju određuje fazni napon mreže V_N , ali, dakako, nju treba u konačnici smatrati superponiranu strujom n -tog harmonika. Izvor generirane struje n -tog harmonika u mreži zamišljamo strujnim izvorom priključenim na čvorište K u kojem se namjerava priključiti kompenzacija. U čvorištu K reaktancija mreže pri osnovnom harmoniku je X_N pa se generirana struja n -tog harmonika I_{Gn} zatvara u krugu s mrežnom reaktancijom pri tom harmoniku ($X_{Nn} = n \cdot X_N$) u punom iznosu, dakle je $I_{Nn} = I_{Gn}$.

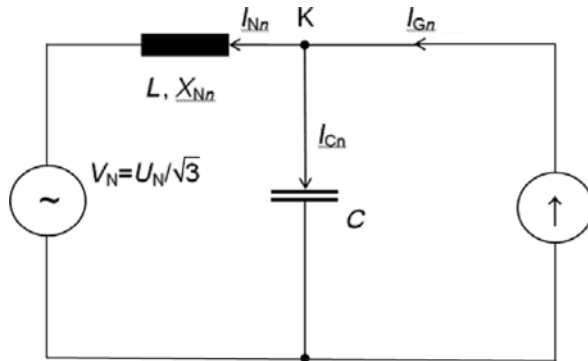


Slika 1.: Promatrana mreža s čvorištem namjeravanog priključka kompenzacije K

Fazni napon n -tog harmonika u čvorištu K je $V_n = I_{Nn} \cdot X_{Nn}$. On se superponira osnovnom harmoniku napona mreže V_N (naravno, idealno sinusnim), te se rezultirajuća trenutačna vrijednost napona izobličuje to više što je napon n -tog harmonika veći, a taj raste s veličinom generirane struje tog harmonika. To povećava ukupnu distorziju napona u mreži i povećava gubitke u realnoj mreži, u kojoj djelatni otpor nije jednak nuli.

2. Prilike u mreži nakon neposredno priključene kompenzacije

Postoje li u mreži potrošači koji osim osnovnog harmonika struje prouzrokuju i pojavu viših harmonijskih članova struje – time na svim impedancijama kojima teku te struje i pojavu viših harmonika napona – kompenzacija primjenom neposredno priključene kondenzatorske baterije nije prihvatljiva bez daljnjeg.



Slika 2.: Mreža s neposredno priključenim kompenzacijskim kondenzatorom

Induktivitet mreže i kapacitet takve kondenzatorske baterije tvore, u odnosu na izvor viših harmonika struje u mreži, paralelni titrajni krug, slika 2., kojim je, uz zanemarenje djelatnog otpora, rezonantni frekvencijski omjer:

$$n_r = \sqrt{\frac{S_k}{Q_C}} \quad (1)$$

Razmotrimo utjecajne veličine, izvodeći tu relaciju. Rezonantni frekvencijski omjer je:

$$n_r = \frac{f_r}{f_{N1}} = \frac{f_r}{50} = \frac{\omega_r}{\omega_{N1}} \quad (2)$$

omjer rezonantne frekvencije tog kruga f_r i nazivne frekvencije osnovnog harmonika mreže $f_{N1} = 50$ Hz. Snaga trolnog kratkog spoja u mreži, slika 1.:

$$S_k = \sqrt{3U_N I_k''} \quad (3)$$

je određena nazivnim linijskim naponom mreže $U_N = \sqrt{3} \cdot V_N$ i početnom strujom trolnog kratkog spoja I_k'' u mreži u čvorištu namjeravanog priključka kompenzacije K. Trofaznu jalovu snagu kondenzatorske baterije Q_C u (1) treba odrediti pri nazivnom naponu mreže i nazivnoj kružnoj frekvenciji osnovnog harmonika ω_{N1} :

$$Q_C = U_N^2 \cdot \omega_{N1} \cdot C \quad (4)$$

$$\omega_{N1} = 2\pi f_{N1} = 2\pi \cdot 50 \approx 314 \text{ 1/s} \quad (5)$$

U relaciji (4) je C fazni kapacitet kondenzatorske baterije spojene u zvijezdu. Rezonantna kružna frekvencija paralelnog LC-spoja, slika 2., je:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (6)$$

Prema prilikama na slici 1., snaga kratkog spoja je:

$$S_k = \frac{U_N^2}{X_N} = \frac{U_N^2}{\omega_{N1}L} \quad (7)$$

odakle je induktivitet mreže u čvorištu priključka kompenzacije

$$L = \frac{U_N^2}{\omega_{N1}S_k} \quad (8)$$

Iz (4) je fazni kapacitet kondenzatorske baterije:

$$C = \frac{Q_C}{\omega_{N1}U_N^2} \quad (9)$$

Uvrstivši L prema (8) i C prema (9) u (6), izlazi rezonantna kružna frekvencija

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{\frac{Q_C}{\omega_{N1}^2 S_k}}},$$

odakle slijedi izraz (1) za rezonantni frekvencijski omjer:

$$n_r = \frac{\omega_r}{\omega_{N1}}.$$

Zaključimo: rezonantna frekvencija titrajnog kruga, nastalog neposrednim priključkom kompenzatorske kondenzatorske baterije na izabrane sabirnice u mreži, ovisna je o snazi trolejnog kratkog spoja u mreži na mjestu priključka i obrnuto razmjerna trofaznoj jalovoj snazi namjeravane kompenzacije. Niža je što je mreža u čvorištu priključka slabija – manja snaga kratkog spoja S_k – i što je namjeravana jalova snaga kompenzacije Q_C veća.

Izvori viših harmonika struje u mreži u pravilu su nižeg reda te su poteškoće na koje će se ukazati istaknutije ako je rezonantna frekvencija mreže i kompenzacije niža. Mora se očekivati potreba rješavanja tih poteškoća ako su mrežne prilike i namjeravana snaga kompenzacije takvi da uvjetuju nisku rezonantnu frekvenciju. Primjerice, ako je snaga kratkog spoja u čvorištu priključka kompenzacije 450 MVA, a snaga namjeravane kompenzacije 50 Mvar, tad je rezonantni frekvencijski omjer jednak 3, dakle određuje treći harmonik nazivne frekvencije.

Ostvari li se u promatranom čvorištu mreže kompenzacija, neposrednim priključkom kondenzatorske baterije na sabirnice u tom čvorištu, prilike opisane

prije priključka kompenzacije će se izmijeniti. Generirana struja n -tog harmonika teče tad paralelom: mrežna reaktancija – kompenzacijski kondenzator.

Napon n -tog harmonika na tim sabirnicama, uz nepromijenjenu generiranu struju, ovisi o impedanciji paralele mrežna reaktancija – kompenzacijski kondenzator. Ako je frekvencija nekog izraženog višeg harmonika generirane struje u mreži bliska ili čak jednaka rezonantnoj frekvenciji mreže i kondenzatora, struja tog harmonika teći će vrlo velikom rezonantnom impedancijom paralele mreža – kondenzator. To će znatno povećati napon tog harmonika u odnosu na napon zatečen u mreži prije priključka kompenzacije. (Prije priključka kompenzacije generirana struja tog harmonika u istoj se vrijednosti zatvara mrežnom reaktancijom.) Uz povećan napon na toj reaktanciji – ako je u rezonanciji s priključenom kondenzatorskom baterijom – doći će i do pojačanja struje mrežnom reaktancijom u odnosu na nepromijenjenu generiranu struju tog harmonika!

Struje I_{Nn} i I_{Cn} su u protufazi (dakako, u našem idealiziranom pristupu u kojem se djelatni otpori zanemaruju, slika 2.), jedna je induktivna, a druga kapacitivna, te je apsolutna vrijednost ukupne struje koja ulazi čvorište K jednaka njihovoj razlici:

$$I_{Gn} = |I_{Nn} - I_{Cn}|, \quad (10)$$

a omjer struja granama obrnuto razmjeran njihovim reaktancijama:

$$\frac{I_{Cn}}{I_{Nn}} = \frac{X_{Nn}}{X_{Cn}} \quad (11)$$

odakle se uređivanjem dolazi do omjera struje mrežnom reaktancijom I_{Nn} , pri frekvencijskom omjeru n , u odnosu na generiranu struju I_{Gn} :

$$\frac{I_{Nn}}{I_{Gn}} = \frac{X_{Cn}}{|X_{Cn} - X_{Nn}|} \quad (12)$$

Kako su u blizini rezonancije ($n \approx n_r$) kapacitivna i induktivna reaktancija podjednake, to:

$$|X_{Cn} - X_{Nn}| \rightarrow 0 \quad (13)$$

izlazi prema (12) da je:

$$I_{Nn} \gg I_{Gn} \quad (14)$$

Omjer struje mrežnom reaktancijom I_{Nn} i generirane struje I_{Gn} ukazuje u blizini rezonantne frekvencije:

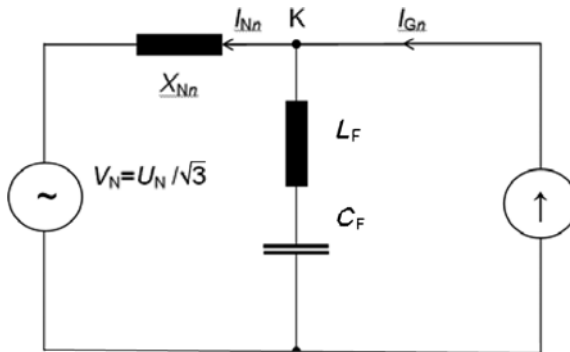
$$f_r = n_r \cdot f_{N1} \quad (15)$$

na iznimno veliko pojačanje generirane struje mrežom. U praktičnim okolnostima to je donekle ograničeno neizbježnim djelatnim otporom u mreži, čiji je utjecaj u ovom načelnom prikazu izostavljen jer je u mrežama visokog napona red vrijednosti $R/X \approx 0,1$ ili manje.

Veliko povećanje generirane struje mrežom vodi velikom povećanju naponskog izobličenja i takav neposredni priključak kompenzacijske kondenzatorske baterije nije prihvatljiv – ukoliko zatečeno naponsko izobličenje u čvorištu namjeravanog priključka kompenzacije nije zanemarivo.

3. Prilike u mreži nakon priključene filtarske kompenzacije

Rješenje se ostvaruje primjenom filtarske kompenzacije, slika 3.; kompenzacijskom kondenzatoru kapaciteta C_F u seriju se dodaje prigušnica konstantnog induktiviteta L_F tako da takva filtarska grana ima serijsku rezonantnu frekvenciju jednaku ili blisku izraženom višem harmoniku u mreži. Ako je takvih izraženih harmonika više, tad treba kompenzaciju razdijeliti u više trofaznih paralelnih grana, svaku s rezonantnom frekvencijom pojedinog višeg harmonika. Takve su trofazne grane onda filtri za pojedini harmonik, a pojedine fazne grane spojene su u zvijezdu.



Slika 3.: Mreža s priključenom filtarskom granom

Rezonantna kružna frekvencija filtra za pojedini viši harmonik treba biti:

$$\omega_F = \frac{1}{\sqrt{L_F C_F}} \quad (16)$$

Rezonantni frekvencijski omjer filtra je:

$$n_F = \frac{\omega_F}{\omega_{N1}} = \frac{1}{\omega_{N1} \sqrt{L_F C_F}} \quad (17)$$

gdje je ω_{N1} nazivna kružna frekvencija osnovnog harmonika mreže. C_F je kapacitet kondenzatorske baterije primijenjene u filtru, takav da baterija pri osnovnom harmoniku napona generira željenu jalovu snagu u pojedinoj fazi:

$$Q_F = V_N^2 \omega_{N1} C_F \quad (18)$$

Dakle, filtarski kapacitet određen je željenom generiranom faznom jalovom snagom, faznim naponom priključka i osnovnim harmonikom kružne frekvencije

$$C_F = \frac{Q_F}{V_N^2 \omega_{N1}} \quad (19)$$

Često je u mreži naglašenije zatečeno više (u pravilu neparnih) viših harmonika. Tad se kompenzacija podijeli primjerice u tri trofazne grane, od kojih svaka generira trećinu željene jalove snage kompenzacije, a rezonantni frekvencijski omjeri su im jednaki izraženim višim harmonicima u mreži, primjerice tri, pet i sedam – kao što je to najčešći slučaj. Tad bi jalova fazna snaga pojedine grane Q_F bila devetina ukupne trofazne snage kompenzacije Q_C .

Induktivitet filtarske prigušnice L_F onaj je koji odgovara kapacitetu C_F , toliki da se postigne željeni frekvencijski omjer filtra, dakle iz (17) on je:

$$L_F = \frac{1}{n_F^2 \omega_{N1}^2 C_F} \quad (20)$$

U relacijama (16) do (20) C_F je fazni kapacitet kondenzatorske baterije spojene u zvijezdu.

Funkcioniranje je razumljivo. Impedancija serijskog spoja prigušnice i kondenzatora najmanja je pri rezonantnoj frekvenciji (da nema djelatnog otpora bila bi jednaka nuli), pa bismo govorili o reaktanciji filtra X_F , jednakoj apsolutnoj razlici reaktancija kondenzatora i filtarske prigušnice, kao u ovom idealiziranom prikazu:

$$X_F(f) = |X_L - X_C| = \left| \omega L_F - \frac{1}{\omega C_F} \right| \quad (21)$$

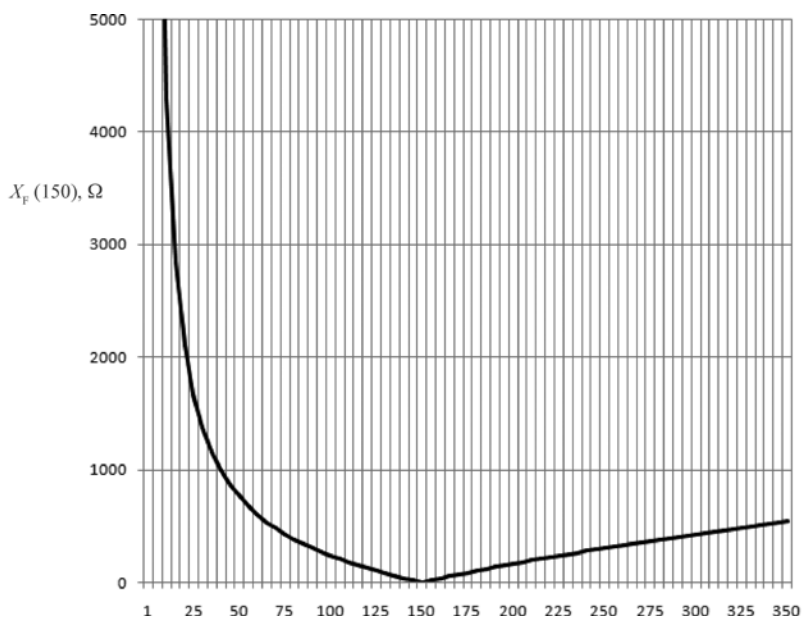
Primjerice, za filter trećeg harmonika, dijagram ovisnosti reaktancije o frekvenciji prikazan je slikom 4. Pri rezonantnoj frekvenciji:

$$|X_L - X_C| \rightarrow 0. \quad (22)$$

Stoga, generirana struja tog harmonika zatvara se pretežnim svojim dijelom filtarskom granom (ta grana praktički je kratki spoj za struju vlastite rezonantne frekvencije filtra), namjesto mrežnom reaktancijom, dakle je:

$$I_{Nn} \ll I_{Gn}. \quad (23)$$

Pri rezonantnoj frekvenciji filtra je dakako i ukupna impedancija paralelnog spoja mreža – filter također vrlo mala (“manja od najmanjeg sudionika paralele”), te se napon tog harmonika na mrežnoj reaktanciji, uz nepromijenjenu generiranu struju tog harmonika, također bitno smanjuje.



Slika 4.: Reaktancija filtra za treći harmonik ovisno o frekvenciji f , Hz

Priključkom, dakle, kondenzatora s prigušnicom – filtra, namjesto neposrednog priključka kondenzatora, postiže se – uz kompenzaciju jalove snage u mreži – i smanjenje opterećenja (“onečišćenja”) mreže višim harmonicima. Dakako, dio instalirane jalove snage kondenzatora utrošit će se za nadoknadu gubitaka jalove snage u prigušnicama, te se kondenzatori dimenzioniraju tako da generiraju traženu jalovu snagu u mrežu, uzevši u obzir i te gubitke. S druge strane, napon koji se uspostavlja na filtarskom kondenzatoru viši je od faznog napona mreže za pad napona na prigušnici; ta su dva napona u protufazi. Ta okolnost podiže opet generiranu jalovu snagu kondenzatora pa i to valja uzeti u obzir.

Zaključno: treba sukcesivnim konvergentnim računom uskladiti parametre filtarske prigušnice i filtarskog kondenzatora, kako bi oni ostvarili i željenu rezonantnu frekvenciju i željenu jalovu snagu kompenzacije.

Literatura

- [1] Kompenzacija 2×25 Mvar u TS 220/110 kV Đakovo, IZE Zagreb, srpanj 1993.
- [2] TS 220/110 kV Đakovo – predprojekt sustavne kompenzacije, Elektroprojekt Zagreb, lipanj 1994.
- [3] Poziv za ponudu isporuke opreme sustavne kompenzacije u TS 220/110 kV Đakovo, HEP i Elektroprojekt Zagreb, travanj 1994.
- [4] Ponuda ABB za isporuku opreme sustavne kompenzacije u TS Đakovo iz srpnja 1994. s dopunama do 1. studenog 1994.
- [5] Studije kratkog spoja prijenosne mreže Hrvatske elektroprivrede za godine 1995. i 2000., IZE Zagreb, srpanj 1992.
- [6] Proračun ukupnih i parcijalnih struja u izvanrednim prilikama v. n. mreže na području PrP Elektroprijenos-Osijek, IZE Zagreb, ožujak 1993.
- [7] Protokol o mjerenju snaga i spektralnoj analizi u TS 220/110 kV Đakovo, ELMAP Split, kolovoz 1994.
- [8] IEC 871-1: 1987: Shunt capacitors for a.c. power system having a rated voltage above 660 V (Performance, testing and rating – Safety requirements – Guide for installation and operation)
- [9] Pravilnik o tehničkim normativima za elektroenergetska postrojenja nazivnog napona iznad 1000 (SL 4/74)
- [10] ABB Schaltanlagen, 9. Auflage, Manheim, 1992.
- [11] Projektni zadatak za glavni i izvedbeni projekt sustavne kompenzacije na 110 kV u TS 220/110 kV Đakovo, HEP, siječanj 1995.
- [12] M. Kalea: *Analiza utjecaja viših harmonika na rješenje sustavne kompenzacije na 110 kV u TS 220/110 kV Đakovo*, Elektrotehnički fakultet u Osijeku, 1995.
- [13] M. Kalea, D. Karavidović: Kompenzacija jalove snage u elektroenergetskoj mreži Slavonije i Baranje, Ref. za 3. savjetovanje HK CIGRÉ, Cavtat, 1997.
- [14] M. Kalea: Utjecaj viših harmonika na rješenje sustavne kompozicije u TS 220/110 kV Đakovo, 3. savjetovanje HK CIGRÉ, Cavtat, 1997.

TS 220/110 kV Đakovo, the First Reactive Power Compensation at 110 kV in Croatia

Marijan Kalea

Abstract: The 110 kV reactive power compensation plant at TS 220/110 kV Đakovo was officially commissioned on November 21, 1997. This facility was of great importance for Slavonia and Baranja's electricity supply in the post-war situation, both in terms of quality and quantity, and its role was already seen in the winter of 1997/1998. The 110 kV voltage connection, the synchronous circuit-breaker switch application, and the phase-dependent inductor coupling, serially coupled with compensating capacitors, fulfilled their role as filters in relation to the higher harmonics in the grid. These are what make this plant a pioneer in relation to the previous reactive power compensations plants in the Croatian electrical power transmission network.

Keywords: TS 220/110 kV Đakovo, reactive power compensation, filter of higher harmonics in the electrical grid