

UDK 621.316.051:621.072.2:681.527

REGULACIJA NAPONA I KOMPENZACIJA JALOVE SNAGE POMOĆU SVC UREĐAJA VOLTAGE CONTROL AND COMPENSATION OF REACTIVE POWER BY SVC DEVICES

Mateo BLASINA – Vitomir KOMEN – Renato ČUĆIĆ

Sažetak: Potražnja za električnom energijom svakim danom progresivno raste, stoga se i trenutačno najveći prijenosni sustavi u svijetu suočavaju s bolnom činjenicom, a to je potreba za golemim ulaganjem u revitalizaciju postojećih sustava, odnosno izgradnju novih, znatno snažnijih prijenosnih i distribucijskih sustava. Osnovni je zahtjev potrošača pouzdana, sigurna i kvalitetna opskrba električne energije, a shodno tome i elektroenergetski sustav mora biti sposoban zadovoljiti takve zahtjeve s obzirom na različita pogonska stanja. Ključni parametri za sigurnost prijenosa električne energije i očuvanja stabilnosti sustava jesu regulacija napona i kompenzacija jalove snage, a njihovu regulaciju moguće je ostvariti pomoću SVC uređaja (statički var kompenzatori) koji se smatraju začetnicima FACTS uređaja, odnosno FACTS tehnologije, koja implementira uređaje temeljene na energetskej elektronici.

Ključne riječi: – regulacija napona i kompenzacija jalove snage
– paralelno priključeni FACTS uređaji
– struktura SVC uređaja
– SVC uređaji i prijenosne mreže

Abstract: With a daily increase in the demand for electricity, the largest transmission systems in the world are facing the harsh reality of enormous investment in the rehabilitation of existing systems and the construction of newer, more powerful transmission and distribution systems. Consumers expect a reliable, safe and quality power – supply. We need power systems capable of satisfying those requirements in varying operating states. The key parameters for power transmission safety and the maintenance of power system stability are voltage control and the compensation of reactive power that can be achieved by SVC devices (Static Var Compensators) which are themselves the origin of the FACTS devices and technology, which control the devices by energy electronics.

Keywords: – Voltage control and compensation of reactive power
– Shunt FACTS devices
– SVC device structure
– SVC devices and transmission grids

1. UVOD

Sigurnost prijenosa električne energije, kao i očuvanje stabilnosti elektroenergetskog sustava zadaće su operatora prijenosnog sustava, za čije ostvarenje operator prijenosnog sustava koristi pomoćne usluge sustava kao što su primarna i sekundarna regulacija napona i jalove snage, hladna i rotirajuća rezerva, sposobnost starta iz beznaponskog stanja, sposobnost izoliranog rada, od onih korisnika mreže koji su opremljeni odgovarajućom opremom [1]. Iako su dodatne usluge sustava nužne, one za sobom povlače i dodatne troškove koji se ne mogu striktno verificirati kroz klasične energetske tarife. Osnovni cilj jest ostvariti maksimalni prijenos djelatne snage kroz prijenosni vod uz što manje gubitke prijenosa, minimizirajući pritom tokove jalovih snaga kroz pojedine elemente mreže. Općenito, potrošnja jalove snage smanjuje iznose napona u pojedinim čvorištima

1. INTRODUCTION

The responsibility for safety of electricity transmission and maintenance of the electric power system (EPS) stability rests with the transmission system operator (TSO). To achieve that, TSO uses ancillary services of the system such as primary and secondary control of voltage and reactive power, cold and spinning reserve, black start capability, and island operation of grid users provided with adequate equipment [1]. Although the additional services of the system are indispensable, they involve additional expenses that cannot be strictly verified through standard energy tariffs. The basic goal is to achieve the maximum transmission of active power through a transmission line involving the least possible transmission losses minimizing reactive power flows through the grid elements. Generally, the consumption of reactive power decreases the voltage in the electric

elektroenergetskog sustava, dok proizvodnja jalove snage povisuje iznose napona. Upravljanjem tokovima jalovih snaga izravno se djeluje na iznose napona u čvorištima sustava ovisno o zahtjevima koji se postavljaju na sam elektroenergetski sustav. U ovom radu utvrđene su karakteristike i područja djelovanja SVC uređaja (engl. Static VAR Compensator) kao začetnika FACTS uređaja (engl. Flexible Alternating Current Transmission System), te njegova primjena u prijenosnim mrežama.

2. PRIMJENA PARALELNO PRIKLJUČENIH FACTS UREĐAJA ZA REGULACIJU NAPONA I KOMPENZACIJU JALOVE SNAGE

Pošto su elektrane u pravilu znatno udaljene od mjesta potrošnje električne energije, prijenos proizvedene jalove snage rezultirao bi velikim gubicima u mreži te dodatnom slabljenju prijenosne moći mreže. Zbog toga je potrebna kompenzacija jalove snage čim bliže potrošačima. Osnovna svrha paralelno priključenih FACTS uređaja leži u regulaciji iznosa napona u određenom čvorištu mreže injektiranjem jalove snage u to čvorište (čvorište priključka FACTS uređaja). Ukoliko je injektirana struja fazno okomita u odnosu na napon koji vlada u točki priključka FACTS uređaja, tada će taj uređaj proizvoditi ili trošiti jalovu snagu što je i osnovna svrha tih uređaja [2]. Ukoliko je riječ o bilo kakvom drugom faznom položaju, rezultat će biti pojava djelatne snage. Ovisno o primjeni pojedinog FACTS uređaja, moguće je direktno utjecati na:

- povećanje prijenosne moći voda
- snižavanje napona u uvjetima malih opterećenja
- povećanje napona u uvjetima visokih opterećenja
- poboljšanje osobina sustava u prijelaznim stanjima
- poboljšanje prijelazne stabilnosti i prigušenje njihanja u sustavu
- kompenzaciju nesimetrija
- kompenzaciju jalove snage
- kompenzaciju flikera.

Neki od najznačajnijih paralelno priključenih FACTS uređaja su:

- SVC – statički var kompenzator
- TCR – tiristorski upravljiva prigušnica
- TSR – tiristorski uklopiva prigušnica
- TSC – tiristorski uklopivi kondenzator
- STATCOM – statički sinkroni kompenzator
- SSG – statički sinkroni generator
- TCBR – tiristorski upravljivi kočni otpor
- SVG – statički var generator
- SVS – statički var sustav
- BESS – baterijski sustav za akumuliranje energije.

power system nodes whereas the generation of reactive power increases the voltage. The reactive power flow control has an effect on the amount of voltage in the EPS nodes, depending on the electric power system requirements. This paper identifies the characteristics and the operation areas of SVC devices (Static VAR Compensator) as the origin of the FACTS devices (Flexible Alternating Current Transmission System), and their use in transmission grids.

2. USE OF THE SHUNT FACTS DEVICES FOR VOLTAGE CONTROL AND COMPENSATION OF REACTIVE POWER

Since power plants are generally located rather far away from the electricity consumption area, the transmission of reactive power produced would generate considerable losses on the grid and further weakening of the grid transfer capacity. Therefore, the reactive power compensation is required as close to the consumers as possible. The basic purpose of shunt FACTS devices is to control the amount of voltage in the grid node by injecting reactive power into the node (the connection node of the FACTS device). If the injected current is phase vertical to the voltage prevailing in the FACTS device connection point, the device will generate or use reactive power and this is the basic purpose of these devices [2]. If any other phase position is involved, the result will be occurrence of active power. Depending on the use of the FACTS device, direct impact is possible on the following:

- Higher transfer capacity of a transmission line,
- Lower voltage under low load conditions,
- Higher voltage under high load conditions,
- Improved characteristics of the system in transient states,
- Improved transient stability and damping of swings in the system,
- Asymmetry compensation,
- Reactive power compensation, and
- Flicker compensation.

Some of the most important FACTS parallel-connected FACTS devices are:

- SVC – Static Var Compensator
- TCR – Thyristor Controlled Reactor
- TSR – Thyristor Switched Reactor
- TSC – Thyristor-switched Capacitor
- STATCOM – Static Synchronous Compensator
- SSG – Static Synchronous Generator
- TCBR – Thyristor-controlled Braking Resistance
- SVG – Static Var Generator
- SVS – Static Var System
- BESS – Battery Energy Storage System.

3. STRUKTURA SVC UREĐAJA

Općenito, statički su kompenzatori uređaji za regulaciju jalove snage u elektroenergetskom sustavu, a da se pritom proizvodnja jalove snage može mijenjati u širokom opsegu [3, 4]. To su uređaji koji mogu proizvoditi ili trošiti kapacitivnu i induktivnu jalovu snagu te na taj način održavati napon (u čvorištu priključka) unutar željenih granica bez obzira na pogonsko stanje. SVC u sebi objedinjuje niz različitih uređaja, uglavnom tiristorski upravljivih, od kojih su najznačajniji tiristorski upravljive prigušnice (TCR) i tiristorski uklopivi kondenzatori (TSC), a sve u cilju postizanja brze i kontinuirane regulacije. Vidljiva je razlika u odnosu na klasične kondenzatorske kompenzatore čija je karakteristika skokovita regulacija. Budući da je osnova ovakvih uređaja energetska elektronika:

- MOSFET tranzistori, IGBT tranzistori
- SCT tiristori (klasični), GTO tiristori, MCT tiristori (suvremene izvedbe),

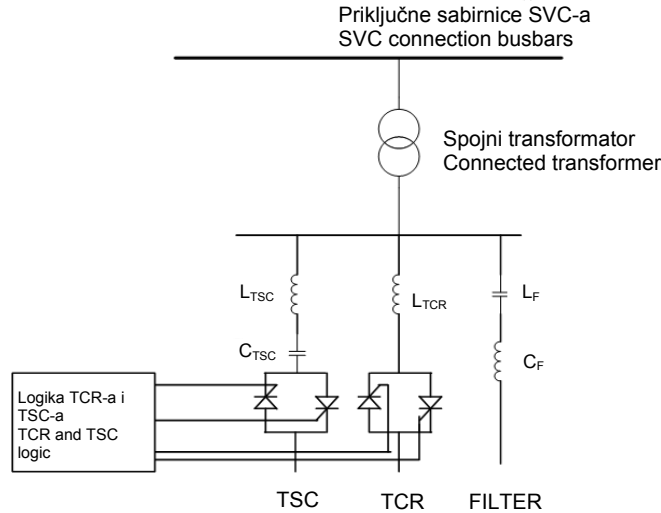
riječ je o relativno osjetljivim poluvodičkim prekidačima, te se zbog naponskih ograničenja njihov priključak na sustav realizira preko odgovarajućih transformatora (moguć je i priključak preko tercijara tronamotnih transformatora). Upotreba SVC-a posljednjih je godina vrlo često primjenjivana metoda i praktički je istisnula primjenu sinkronih kompenzatora budući da imaju slične tehničke karakteristike, ali su bitno pouzdaniji u pogonu. Struktura SVC-a prikazana je na slici 1., a ostvarena je kombinacijom TCR-a i TSC-a. Priključak SVC uređaja ostvaren je putem zasebnog transformatora, a dodatni filtri omogućuju injektiranje jalove snage osnovne (zahtijevane) frekvencije. Općenito, u gotovo svih FACTS uređaja potrebna je ugradnja dodatnih filtera, kako bi se onemogućilo injektiranje viših harmonika u izmjenični sustav. U pravilu SVC uređaji sadrže filtre za uklanjanje harmonika 3., 5. i 7. reda, dok se harmonici viših redova praktički zanemaruju zbog vrlo malog utjecaja na valni oblik napona, odnosno struje u čvorištu priključka SVC-a. Kombinacijom TCR-a i TSC-a (SCV TSC – TCR), ostvaruje se veća fleksibilnost u kontroli rada, smanjenje injektiranja struja viših harmonika i bolje karakteristike samog uređaja u uvjetima kvara. Naravno, što je veći broj elemenata ugrađen u SVC, to su njegove karakteristike bolje i opsežnije, što prati i povećanje cijene samog uređaja. Upravljački signal dovodi se na tiristore preko naponskog transformatora, direktno sa priključnih sabirnica. TSC se uključuje uz pomoć dva tiristorska ventila (dovođenjem upravljačkog signala na upravljačke elektrode tiristora), a isključuje se ako prekinemo dovod upravljačkog signala (uz pomoć regulatora – logika upravljačkih elemenata) na upravljačke elektrode tiristora i kada struja kroz tiristore opadne ispod vrijednosti struje držanja istih.

3. SVC DEVICE STRUCTURE

Generally, Static Var Compensators are the devices for controlling reactive power in the electric power system allowing for a wide range of changes in reactive power generation [3, 4]. They are the devices capable of production or consumption of capacitive and inductive reactive power, thus maintaining the voltage (at the connection node) within the limits desired, regardless of the operating state. The SVC incorporates a series of different devices, mainly thyristor-controlled, among which the most significant are thyristor-controlled reactors (TCR) and thyristor-switched capacitors (TSC); all aimed at achieving quick and continuous regulation. There is a noticeable difference in the relation to the conventional capacitor compensators featuring step regulation. Since these devices are based on energy electronics such as:

- MOSFET transistors, IGBT transistors
- SCT thyristors (conventional), GTO thyristors, MCT thyristors (present-day design),

it is a question of relatively sensitive semiconductor switches and because of the voltage restrictions their connection to the system is done via adequate transformers (the connection can be made through the tertiary of 3-winding transformers). In recent years, the SVC has become a frequently used method that has almost completely replaced the use of synchronous compensators, their technical characteristics are alike but their operating reliability is much higher. Figure 1 illustrates the SVC structure as a TCR and TSC combination. A separate transformer and additional filters are used to make a SVC device connection to allow injection of reactive power of the basic (required) frequency. Generally, almost all FACTS devices require additional filters to prevent injection of higher harmonics into the alternating-current system. As a rule, the SVC devices have filters for removal of the 3rd, 5th and 7th order of harmonics, whereas the higher harmonics are disregarded because their influence on the voltage waveform and the current at the SVC connection node is small. The combination of TCR and TSC (SVC TSC – TCR) allows higher flexibility in operational control, smaller injection of higher harmonics currents, and better characteristics of the device in case of failure. Of course, the higher the number of elements installed in the SVC, the better and broader characteristics of the device, which results in the higher price of the device. The control signal is sent to the thyristors directly from the connected busbars through a voltage transformer. The TSC is switched on by means of two thyristor valves (by sending the control signal to the thyristor control electrodes). It is switched off if the control signal is no longer supplied (by means of a controller – control element logic) to the thyristor control electrodes, even when the current through the thyristors drops below the value of the current required for their maintenance.



Slika 1. Struktura SVC uređaja
Figure 1. SVC device structure

Strujom prigušnice i vremenom vođenja TCR-a upravlja se putem tiristorskog prekidača. Tiristori se upravljaju putem kuta paljenja, a način regulacije ovisi o zahtjevima koji se postavljaju na TCR, odnosno na sam SVC. Regulacija je kontinuirano promjenljiva putem djelomičnog vođenja tiristora. Struja TCR-a može se kontinuirano mijenjati od nule (odgovara nultoj vrijednosti kuta vođenja), do maksimalne vrijednosti (kut vođenja od 180°). Kut paljenja označen je s α , dok je kut vođenja tiristora označen sa σ . Kut α može se mijenjati od 180° do 90° . Trenutna vrijednost struje i_{TCR} preko polovine periode može se iskazati jednadžbom:

The reactor current and TCR control time is controlled by the thyristor switches. The thyristors are controlled by the firing angle and the control mode depends on the TCR and SVC requirements. The control is continually changeable by means of the partial control of thyristors. The TCR current can constantly change from zero (it corresponds to the zero value of the control angle) to the maximum value (control angle of 180°). The firing angle symbol is α , whereas a symbol for the thyristor control angle is σ . The angle α can vary from 180° to 90° . The instantaneous value of current i_{TCR} above a half of the period could be expressed by the following equation:

$$i_{TCR} = \begin{cases} \frac{\sqrt{2} \cdot V}{X_L} \cdot (\cos \alpha - \cos \omega t), & \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ 0, & \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \end{cases}, \quad (1)$$

gdje je V efektivna vrijednost priključenog napona, a X_L reaktancija osnovne frekvencije (fundamentalna reaktancija). Budući da se radi o nesinusoidalnom obliku struje i_{TCR} , prisutni su i viši harmonici koji negativno utječu na valni oblik injektiranja struje u čvorištu priključka SVC-a, gdje se osnovna komponenta struje može iskazati jednadžbom:

where V is the effective value of the voltage connected and X_L is the reactance of the basic frequency (fundamental reactance). Since it is a question of a non-sinusoidal form of the current i_{TCR} , there are higher harmonics present, which affect the waveform of the injected current into the SVC connection node. The basic current component could be expressed as follows:

$$I_1 = B_{TCR}(\sigma) \cdot V, \quad (2)$$

gdje je $B_{TCR}(\sigma)$ regulacijska susceptancija TCR-a i u funkciji je kuta vođenja σ , što se može predstaviti jednadžbom:

where $B_{TCR}(\sigma)$ is the control susceptance of the TCR and it is in the function of the control angle σ , which could be presented by the equation:

$$B_{TCR}(\sigma) = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi \cdot X_L}. \quad (3)$$

Povezanost kuta vođenja i kuta paljenja može se iskazati jednadžbom:

The relation between the control angle and the firing angle could be presented by the equation:

$$\sigma = 2 \cdot (\pi - \alpha). \quad (4)$$

Budući da struja i_{TCR} sadrži više harmonike, jednadžbu (1) moguće je iskazati na način da se uzmu u obzir i viši harmonici (neparni). Rezultat jest složeniji izraz za struju TCR-a koja u sebi objedinjuje i n-te harmonike prema relaciji:

$$I_n = \frac{V}{X_L} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \left[\frac{\sin \alpha \cdot \cos(n\alpha) - n \cdot \cos \alpha \cdot \sin(n\alpha)}{n \cdot (n^2 - 1)} \right], n = 2k + 1, k = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

Utjecaj viših harmonika, a posebice se to odnosi za 13., 15., 17. i ostali, u pravilu se zanemaruju jer nemaju praktički nikakav utjecaj na električne veličine u čvorištu priključka SVC-a. Problem nižih harmonika rješava se uporabom različitih filtra (aktivnih ili pasivnih) koji se nalaze u samoj strukturi TCR-a, odnosno SVC-a. Budući da se SVC priključuje na sustav preko transformatora, nužnost je da je SVC spojen u trokut, što rezultira prodiranjem tek 7. harmonika u sustav i svakog sljedećeg (neparnog).

Tiristorski uklopivi kondenzator TSC također predstavlja osnovnu komponentu SVC uređaja (slika 1.). Tiristorski prekidači koriste se za uključivanje i isključivanje poprečnog kondenzatora, čime se omogućuje skokovita promjena jalove snage koja se unosi u izmjenični sustav. Kada priključujemo kapacitet na izmjenični sinusni napon, veliki će iznos struje poteći kroz kondenzator ako je inicijalni napon na kondenzatoru različit od napona napajanja u samom trenutku uklapanja tiristora. Struja kroz kondenzator bit će konačna (s obzirom na stacionarno stanje) ako je inicijalni napon na kondenzatoru jednak naponu napajanja u trenutku uklapanja tiristora. Međutim, veličina promjene struje vrlo je visoka u odnosu na veličinu struje koju mogu podnijeti sami tiristori. Kako bi se ograničila ta promjena struje, nužno je umetnuti dodatnu prigušnicu u seriji s kondenzatorom i tiristorima L_{og} , a pored toga ona će onemogućiti i nastanak rezonancije s izmjeničnom mrežom. Napon napajanja TSC-a definiran je izrazom:

$$v(t) = \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin(\omega_0 t + \alpha), \quad (6)$$

gdje je ω_0 kružna frekvencija. Pretpostavka je da se tiristori uklapaju u trenutku $t = 0$ s, s početnim uvjetima definiranim sa:

$$i(t = 0) = 0 \quad i \quad v_c(t = 0) = V_{C0}. \quad (7)$$

Tada za struju TSC – a vrijedi:

$$i(t) = \sqrt{2} I_{AC} \cdot \cos(\omega_0 t + \alpha) - n \cdot B_C \cdot \left[V_{C0} - \frac{n^2}{n^2 - 1} \cdot \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin \alpha \right] \cdot \sin(\omega_n t) - \sqrt{2} I_{AC} \cdot \cos \alpha \cdot \cos(\omega_n t), \quad (8)$$

gdje je:

$$\text{where:} \quad I_{AC} = \frac{V \cdot B_C \cdot n^2}{n^2 - 1}. \quad (9)$$

Since the current i_{TCR} contains higher harmonics, the equation (1) could be presented to take into account the higher harmonics as well (odd). The result is a more complex expression for the TCR current, which also incorporates n^{th} harmonics according to the relation:

The influence of higher harmonics, particularly referring to the 13th, 15th, 17th and others, is generally neglected because they actually have no impact on the electric quantities in the SVC connection node. The lower harmonics issue is solved by different filters (active and passive) found in the TCR and SVC structure, respectively. Since the SVC is connected to the system via transformers, the SVC should be delta connected, which results in penetration of only 7th harmonics into the system and then every other (odd) harmonics.

A thyristor – switched capacitor (TSC) is also a basic component of the SVC device (Figure 1). Thyristor type switches are used for on/off switching of the transverse capacitor, thus allowing step changes in the reactive power injected into the AC system. When a condenser of a specific capacity is connected to the AC sinusoidal voltage, a large amount of current will run through the capacitor if the initial voltage on the capacitor varies from the supply voltage at the moment of thyristor closing. The current through the capacitor will be final (with respect to the steady state) if the initial voltage on the capacitor equals the supply voltage at the moment of thyristor closing. However, the magnitude of the current change is very high in relation to what the current thyristors could sustain. In order to restrict the change, another reactor should be installed in a series with the capacitor and thyristors L_{og} , which will also prevent resonance with the alternating – current grid. The TSC supply voltage is defined by the following expression:

where ω_0 is circular frequency. It is assumed that the thyristors are closed when $t = 0$ s, with the initial conditions defined by:

Za parametre iz jednadžbi (8) i (9) vrijedi:

$$n = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}, \quad \omega_n = n \cdot \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_{og} C_{isc}}}, \quad B_C = \frac{1}{X_C}. \quad (10)$$

Iznos prigušnice odabire se tako da vrijedi $n > 3$, dok se područje napona V_{CO} kondenzatora kreće od 0 do (11).

$$\sqrt{2}V \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right). \quad (11)$$

Sva električna oprema mora biti odabrana tako da može izdržati različita električna preopterećenja koja nisu povezana uz normalno pogonsko stanje. To mogu biti različiti kratki spojevi, prenaponi ili različita prijelazna stanja. Kada ta izvanredna stanja dostignu svoj maksimum nužno je osigurati adekvatnu zaštitu uređaja. Nužno je obratiti pažnju na tiristorske prekidače koji omogućuju uklapanje TSC-a, odnosno TCR-a kao osnovnih elemenata SVC uređaja. Neki od kvarova koji se mogu pojaviti vezani uz energetske tiristore su:

- paljenje tiristora u krivom trenutku,
- nedostatak paljenja na jednom od tiristora ili cijeloj sekciji,
- različita mehanička oštećenja tiristora,
- naponska preopterećenja i strujna (temperaturna) preopterećenja.

Potrebno je vršiti stalni nadzor električnih krugova tiristora (monitoring), kako bi se na vrijeme utvrdilo stanje pojedinih tiristora, te se po potrebi primjenile adekvatne mjere za sprečavanje oštećenja. Kod TCR-a je moguća podjela na dvije sekcije gdje su tiristorski prekidači povezani u sredini tih sekcija. Na taj se način onemogućuje nastanak kratkog spoja kroz cijeli TCR uređaj i vrlo je mala vjerojatnost da će kratki spoj nastati simultano u obje sekcije. Od previsokih temperatura tiristori se štite hlađenjem, a kao najznačajniji sistem hlađenja jest sustav sa vodenim hlađenjem, koji je zamijenio zračno hlađenje kao zastarjelu metodu.

4. SVC UREĐAJ I PRIJENOSNE MREŽE

4.1. Podloge i metodologija

Prikazan je utjecaj SVC uređaja na električne prilike u mjestu priključka na elektroenergetski sustav (iznosi svih napona u čvorištima), te tokovi snaga duž prijenosnog voda V1_8 kao najdužeg voda testnog modela elektroenergetskog sustava prikazanog na slici 2 [5]. Mreža se sastoji od 8 čvorišta s 13 sabirnica, 16 vodova, 10 mrežnih i 10 blok transformatora, te 6 elektrana. Od 16 vodova, 4 su 400 kV naponske razine, 9 su 220 kV naponske razine i 3 su 110 kV naponske razine. Opterećenja su priključena u čvorištima 1, 2, 3, 4, 6, 7 i 8,

The following applies to the parameters from the equations (8) and (9):

The amount of reactor reactance is selected to be $n > 3$, whereas the voltage area V_{CO} of the capacitor ranges from 0 to (11).

All electrical equipment should be selected as to sustain different electrical overloads that do not relate to the normal operating state. They could be different short circuits, overvoltages, or different transient states. When those extraordinary states reach their maximum, the devices should be provided with adequate protection. Attention should be paid to the thyristor switches, which are the basic elements of the SVC devices that enable TSC and TCR closing. Some of the defects that might occur relating to the energy thyristors are:

- Thyristor firing at the wrong moment,
- Firing failure on one of the thyristors or the entire section,
- Different mechanical damages of the thyristor,
- Voltage and current (temperature) overloads.

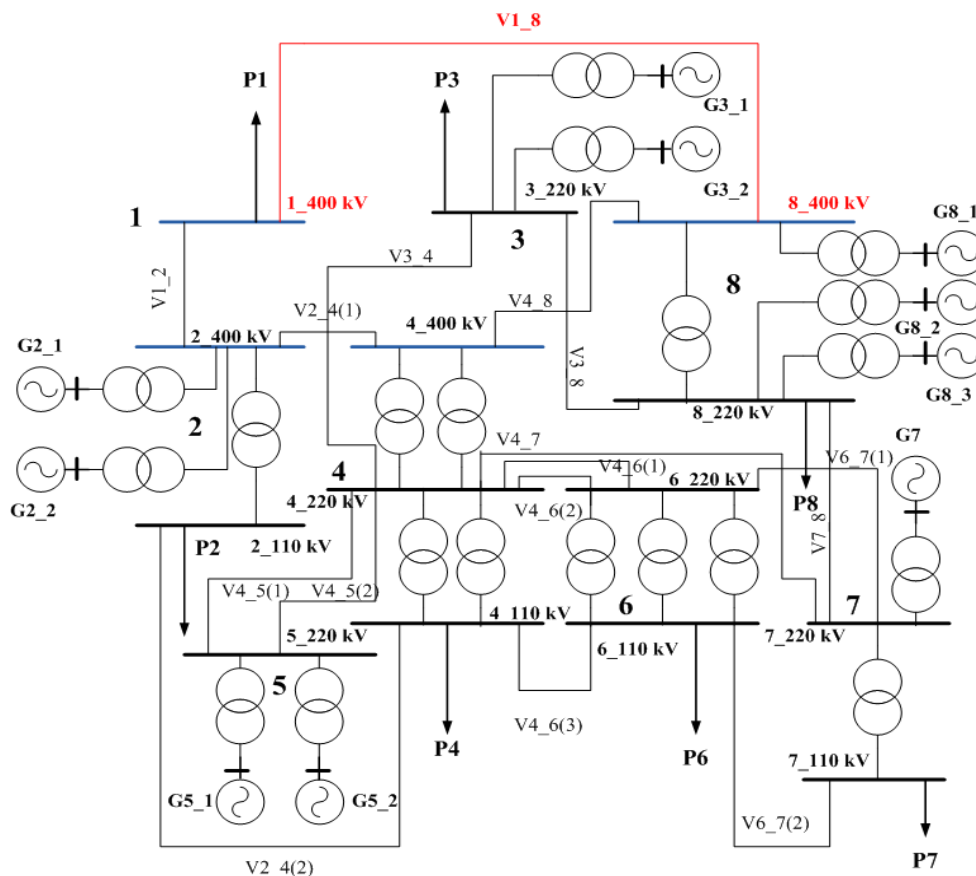
To identify the condition of each thyristor and, if need be, to apply adequate measures for prevention of damage, electrical circuits of thyristors should be subject to ongoing inspection. TCSs could be divided into two sections, with the thyristor switches connected in the middle of the sections. In such a way, a short circuit occurrence is not possible throughout the entire TCR device and it is very unlikely that a short circuit will happen simultaneously in both sections. The thyristors are protected from high temperatures by cooling. The most important cooling system is a water cooling system, which has replaced the air cooling system as an obsolete method.

4. SVC DEVICE AND TRANSMISSION GRIDS

4.1. Documentation and Methodology

The paper describes the impact of SVC devices on the electrical circumstances at the connection point of the electric power system (all the voltages in the nodes), and the power flows along the transmission line V1_8, which is the longest line of the EPS test model illustrated in Figure 2 [5]. The grid consists of 8 nodes with 13 busbars, 16 lines, 10 grid and 10 unit transformers, and 6 power plants. Out of 16 lines, 4 of them are 400 kV, 9 are 200 kV, and 3 of them 110 kV. The loads are connected to the nodes 1, 2, 3, 4, 6, 7, and 8. The loads

a iznosi tih opterećenja, kao i faktori snage prikazani su u Tablici 1. and power factors are showed in Table 1.



Slika 2. Test model elektroenergetskog sustava
Figure 2. Electric power system test model

Svi vodovi u testnom modelu na slici 2. okarakterizirani su svojom duljinom, radnim otporom, reaktancijom, susceptancijom te maksimalno dozvoljenom strujom u normalnom pogonu.

Transformatori su definirani prividnom snagom, prijenosnim omjerom, naponom kratkog spoja, strujom magnetiziranja, gubitcima u kratkom spoju i praznom hodu, mogućnošću regulacije, te grupom spoja.

Sinkroni generatori u elektranama predstavljeni su nazivnom prividnom snagom, faktorom snage, maksimalnom radnom snagom na pragu, maksimalnom i minimalnom jalovom snagom (pogonska karta sinkronog generatora) te svojim reaktancijama.

Proračun iznosa napona u pojedinim čvorištima prikazan je u tablici 1. s obzirom na zadano pogonsko stanje testnog modela elektroenergetskog sustava. Prikazani su iznosi napona na sabirnicama 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 za sve prisutne naponske razine 400 kV, 220 kV, 110 kV (u apsolutnim iznosima te u per-unit vrijednostima), kao i opterećenja koja vladaju u pojedinim čvorištima mreže.

All the lines illustrated in the test model in Figure 2 are characterized by their length, operating resistance, reactance, susceptance, and maximum allowed current in normal operation.

The transformers have been defined by apparent power, transmission ratio, short circuit voltage, magnetizing current, losses in the short circuit and during idle run, controllability, and connection group.

The synchronous generators in the power plants are defined by the apparent power, power factor, maximum operating power at the threshold, maximum and minimum reactive power (operating chart of the synchronous generator), and their reactances.

The voltage calculation in each node is given in Table 1 with regard to the operating state defined for the EPS test model. The voltages on the busbars 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 are shown for all the voltage levels involved (400 kV, 220 kV, and 100 kV) (in absolute amounts and in per-unit values) as well as the loads prevailing in each power grid node.

Tablica 1. Iznosi napona u pojedinim čvorištima mreže bez priključenog SVC uređaja
Table 1. Voltages in each power grid node without the SVC device connected

SABIRNICA BUSBAR	NAPONI VOLTAGES		TERETI LOADS		
	R. br. No	U [kV]	U [p.u.]	P [MW]	Q [Mvar]
1_400	446,0	1,12	450	100,41	0,976
2_400	459,15	1,15	--	--	--
2_110	127,03	1,15	180	72,27	0,928
3_220	251,37	1,14	240	35,89	0,989
4_400	420,56	1,05	--	--	--
4_220	224,71	1,02	--	--	--
4_110	114,13	1,04	198	90,21	0,910
5_220	220,31	1,00	--	--	--
6_220	215,47	0,98	--	--	--
6_110	109,01	0,99	276	89,73	0,951
7_220	216,51	0,98	--	--	--
7_110	107,28	0,98	120	35,92	0,958
8_400	424,37	1,06	--	--	--
8_220	218,99	1,00	540	228,41	0,921

4.2. Pogonsko stanje sa priključenim SVC uređajem na sabirnice 1_400 kV u čvorište 1

Za održavanje napona u željenim iznosima u pojedinim čvorištima mreže iskorišten je SVC uređaj koji je sastavljen od tiristorski upravljivih prigušnica – TCR, te tiristorski uklopivih kondenzatora – TSC. Pored toga, generatori G3_1, G7, G5_1 i G5_2 dostigli su minimalni iznos reaktivne snage s obzirom na vlastitu pogonsku kartu i na zahtjeve potrošnje. Stoga je nužno izvršiti regulaciju napona i kompenzaciju jalove snage. Korišteni SVC uređaj priključen na sabirnice 1_400 kV ima sljedeće podatke:

- TCR – reaktivne snage 125 MVar
- TSC – reaktivne snage - 125 MVar
- održavanje napona u čvorištu priključka na iznosu od 1.00 p.u (400 kV)
- balansirana regulacija.

Promatrano je djelovanje SVC uređaja na 400 kV mrežu, uz održavanje napona na sabirnicama 1_400 kV na točnom iznosu od 400 kV (1.00 p.u.). Dodatni filteri i priključni transformator SVC-a u ovom su proračunu izostavljeni. U tablici 2. prikazani su iznosi napona za 400 kV mrežu testnog modela elektroenergetskog sustava, kao referentnu mrežu u području djelovanja SVC uređaja. Pored toga, promatrani su tokovi snaga duž 400 kV voda V1_8 prema slici 2., s priključenim i bez priključenog SVC uređaja. Dobiveni rezultati tokova snaga prikazani su u tablici 3. Opterećenja u čvorištima su ostala nepromijenjena.

4.2. The operating state with a SVC device connected to the busbars 1_400 kV in the node 1

A SVC device consisting of thyristor – controlled reactors (TCR) and thyristor – switched capacitors (TSC) is used to maintain the voltage desired in each power grid node. In addition, the generators G3_1, G7, G5_1, and G5_2 have reached the minimum amount of reactive power with respect to their operating diagram and the consumption requirements. That is why the regulation of voltage and compensation of reactive power should be performed. The properties of the SVC device connected to the busbars 1_400 kV are the following:

- TCR –125 MVar reactive power
- TSC –125 MVar reactive power
- Voltage maintenance in the connection node to 1.00 p.u. (400 kV)
- balanced control.

The operation of the SVC device to 400 kV grid has been observed with the voltage maintained at 1_400 kV busbars to the exact amount of 400 kV (1.00 p.u.). The additional filters and the SVC connected transformer have been left out in this calculation. Table 2 shows the amounts of voltage for the 400 kV grid of the EPS test model as a reference grid in the area of SVC device operation. In addition, the power flows have been observed along the 400 kV transmission line V1_8 as illustrated in Figure 2, with and without the SVC device connected. The results obtained for the power flows are given in Table 3. The loads in the nodes have remained the same.

Tablica 2. Iznosi napona u 400 kV mreži sa priključenim SVC uređajem na sabirnice 1_400 kV

Table 2. Amounts of voltage in 400 kV grid with the SVC device connected to the busbars 1_400 kV

SABIRNICA BUSBAR	NAPONI VOLTAGES	
R.br. Number	U [kV]	U [p.u.]
1_400	400	1,00
2_400	416,99	1,04
4_400	379,96	0,95
8_400	399,32	1,00

Tablica 3. Tokovi jalovih i djelatnih snaga kroz vod V1_8

Table 3. Flow of reactive and active power through the line V1_8

Tokovi snaga – vod V1_8 Power flows – Line V1_8						
SABIRNICA BUSBAR	Bez SVC uređaja Without SVC device			Sa SVC uređajem With SVC device		
	P[MW]	Q[MVAr]	Postotak opterećenja na vodu Line load percentage [%]	P[MW]	Q[MVAr]	Postotak opterećenja na vodu Line load percentage [%]
1_400	-40,58	-2,36	28,04	-43,68	-76,79	15,30
8_400	41,17	-191,61	28,04	43,80	-90,57	15,30

Prilikom uklapanja SVC uređaja na sabirnice 1_400 kV, iznos napona na svim 400 kV sabirnicama je unutar dozvoljenih odstupanja, što se vidi iz tablice 2. Kako bi iznos napona na 1_400 kV sabirnici bio točno 400 kV, SVC je injektirao 73,34 MVAr jalove snage u čvorištu priključka održavajući tako definirani iznos napona konstantnim, a da su pritom naponi u preostalim 400 kV sabirnicama poprimili zadovoljavajuće vrijednosti. To je i osnovna ideja primjene SVC uređaja. Prijenosni vod V1_8 odabran je iz razloga što je to najduži vod u testnom modelu elektroenergetskog sustava, pa se shodno tome očekuju i najveći problemi vezani uz održavanje napona u čvorištima 1 i 8 koje taj vod povezuje. Iz tablice 3. vidljivo je da su tokovi jalovih snaga kroz vod V1_8 preveliki bez izvršene kompenzacije jalove snage, a posljedica toga jest i veći postotak opterećenja voda. Uz priključen SVC-uređaj na sabirnice 1_400 kV, tokovi jalovih snaga se kompenziraju, iznosi napona u 400 kV čvorištima poprimaju zadovoljavajuće vrijednosti, a pritom se smanjuje i opterećenje voda za 12,74 %. Gubitci duž voda V1_8 (između čvorišta 1 i 8) bez priključenog SVC uređaja iznose 0,59 MW, dok se s priključenim SVC uređajem smanjuju na iznos od 0,12 MW. Kao rezultat smanjenja gubitaka jalove snage ostvaruje se povećanje prijenosne moći voda, te se u tome očituju prednosti SVC uređaja naspram konvencionalnih kompenzacijskih uređaja. Niski tokovi djelatnih snaga kroz vod V1_8 posljedica su slabo opterećenog voda, a pritom je to i najduži vod u testnom modelu elektroenergetskog sustava.

When switching the SVC device to 1_400 kV busbars, the amount of voltage on all 400 kV busbars is within the tolerances, as can be seen in Table 2. In order to have exactly 400 kV on the 1_400 kV busbar, the SVC has injected 73.34 MVAr of reactive power into the connection node, thus constantly maintaining the defined amount of voltage. The voltages in the remaining 400 kV busbars assumed satisfactory values. This is the basic idea of using the SVC devices. The reason for selecting the V1_8 transmission line was because it was the longest line in the EPS test model and consequently, the largest problems are expected in maintaining the voltage in nodes 1 and 8 connected by that line. It is understood from Table 3 that the reactive power flows through the V1_8 line are too large without reactive power compensation and the consequence thereof is a higher percentage of line load. With the SVC device connected to the busbars 1_400 kV, the reactive power flows are compensated, the amounts of voltage in the 400 kV nodes assume satisfactory values, and the line load is reduced by 12.74 %. The losses along the V1_8 line (between nodes 1 and 8) with no SVC device connected are 0.59 MW, whereas with the SVC device connected they are reduced to 0.12 MW. Because of the lower loss of reactive power, the line transfer capacity is higher, which shows the SVC device advantages as compared to the conventional compensation devices. The low active power flows through the V1_8 line are the result of a poorly loaded line, which is again the longest line in the EPS test model.

5. ZAKLJUČAK

Nagli razvoj uređaja energetske elektronike rezultirao je razvojem fleksibilnih prijenosnih sustava izmjenične struje – FACTS, te razvojem fleksibilno pouzdanih i inteligentnih sustava za distribuciju električne energije – FRIENDS. Koncept FACTS-a prvobitno je osmišljen 1980-ih godina (tehnički je razrađen u *Electric Power Research Institute*, Palo Alto, California – EPRI) kako bi riješio probleme vezane uz ograničenja novih prijenosnih vodova, poboljšanja parametara stabilnosti sustava, te olakšavanja razmjene energije između različitih proizvodnih poduzeća i velikih industrijskih potrošača.

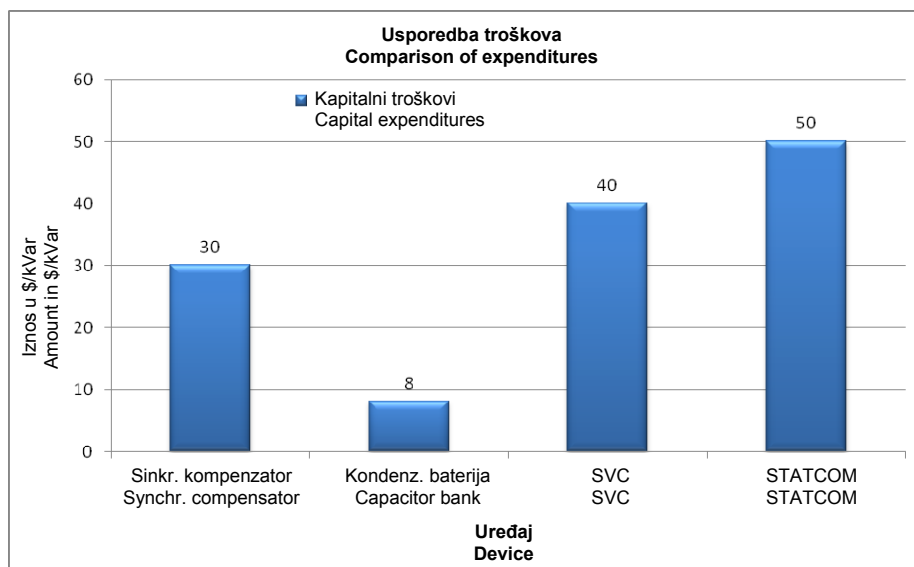
S druge strane, koncept FRIENDS-a osmišljen je 1990-ih godina kako bi omogućio da se distribuirani izvori energije i sustavi za skladištenje električne energije što više približe potrošačima (industrijskim i ostalim velikim potrošačima) električne energije. Na taj način u sektoru distribucije bit će moguće primijeniti rješenje po mjeri potrošača. Provedenom simulacijom testnog modela u programskom paketu DlgSILENT, utvrđeno je da se primjenom SVC uređaja mogu znatno poboljšati stabilnost i upravljivost elektroenergetskog sustava, a posebice je to vezano uz regulaciju tokova jalovih snaga. Injektiranje jalove snage uz pomoć SVC-a u čvorištu priključka rezultira stabilizacijom napona u čvorištu priključka, a shodno tome i u ostalim susjednim čvorištima. Simulacijom je također utvrđeno da se primjenom SVC uređaja mogu smanjiti gubici duž voda, odnosno opterećenje samog voda, što za posljedicu ima i povećanje mogućnosti prijenosa djelatne snage duž prijenosnog voda. Pored širokog opsega regulacije, bilo da je riječ o induktivnom ili kapacitivnom karakteru, SVC uređaje karakterizira brzi odziv, relativno niski gubici, kao i neosjetljivost na promjene napona i frekvencije, te kontinuirana regulacija što je i osnovna prednost suvremenih FACTS uređaja, a time i SVC uređaja u odnosu na konvencionalne uređaje. Prednost FACTS uređaja naspram konvencionalnih očituje se i u mogućnosti korištenja kod HVDC sustava, odnosno u visokonaponskim istosmjernim prijenosnim sustavima koji se posljednjih godina sve više grade. FACTS uređaji pokazali su izrazito dobre karakteristike u radu kada se implementiraju u strukturu HVDC sustava.

Isplativost ugradnje SVC uređaja u elektroenergetski sustav nije upitna (slika 3.) iz razloga što se kapitalni troškovi po proizvedenom kVAR-u kreću između 45-50 USD, što je nešto više u odnosu na sinkrone kompenzatore (30-35 USD). Međutim, uzimajući u obzir da su pogonski troškovi sinkronog kompenzatora izrazito visoki u odnosu na SVC, te sve dodatne mogućnosti koje može pružiti SVC uređaj (uz obavljanje više funkcija odjednom), nedvojbeno je svjetla budućnost FACTS tehnologije, a samo će daljnji razvoj (posebice energetske elektronike) dodatno potvrditi sve prednosti SVC, odnosno FACTS uređaja prezentiranih ovim radom.

5. CONCLUSION

An abrupt development of the energy electronics devices resulted in the development of Flexible Alternating – Current Transmission Systems (FACTS), and development of Flexible, Reliable and Intelligent Energy Delivery Systems (FRIENDS). The FACTS concept first appeared in the 1980s and technically was elaborated in the Electric Power Research Institute Palo Alto California – EPRI in order to solve problems relating to the restrictions of the new transmission lines, improvement of the system stability parameters, and easy exchange of energy between different generation companies and large industrial consumers. On the other hand, the FRIENDS concept appeared in 1990 to make the distributed energy sources and the electricity storage systems closer to the electricity consumers (industrial and other large consumers). This will allow application of customer – tailored solutions in the distribution sector. The simulation of the test model in the DlgSILENT program package demonstrated that the stability and controllability of the electric power system could significantly improve, particularly when it relates to the control of reactive power flows. When the reactive power is injected in a connection by means of the SVC, the voltage in the connection node is stabilized and consequently also in other neighbouring nodes. The simulation also demonstrated that when using the SVC devices, the losses on the line could be reduced as well as the line loadability, which results in higher transmission capacity along the transmission line. Beside a wide regulation range, either of an inductive or of a capacitive character, the SVC devices are characterized by a quick response, relatively low losses, insusceptibility to voltage and frequency changes, and continuous regulation, which is the basic advantage of the present – design FACTS and SVC devices with respect to the conventional ones. The advantage of the FACTS devices as compared to the conventional ones is manifested by the possibility of using them with HVDC systems and in HVDC transmission systems that have been increasingly constructed in recent years. The FACTS devices have demonstrated exceptional characteristics in operation when implemented in the HVDC system structure.

The cost – efficiency of installing the SVC devices in the electrical power system is not questioned (Figure 3) because the capital expenditures per generated kVAR range from 45 to 50 USD, which is slightly higher than the synchronous compensators (30 – 35 USD). However, taking into account the operating costs of synchronous compensators, which are much higher than the SVC operating costs, and all other possibilities that could be provided by the SVC device (multi – functional), there is no doubt that the FACTS technology will have a bright future. Further development (energy electronics in particular) will additionally confirm all the advantages of the SVC and FACTS devices addressed in this paper.



Slika 3. Usporedba kapitalnih troškova konvencionalnih i FACTS uređaja
Figure 3. Comparison of capital expenditures for conventional and FACTS devices

6. POPIS OZNAKA

kut paljenja tiristora
kut vođenja tiristora
trenutna vrijednost struje TCR-a
osnovna komponenta struje TCR-a
struja TCR-a sa uvažanim višim harmonicima
reaktancija TCR-a
reaktancija TSC-a
efektivna vrijednost priključenog napona
regulacijska susceptancija TCR-a
susceptancija TSC-a
kružna frekvencija
redni broj harmonika
napon napajanja TSC-a
induktivitet za ograničenje struje TSC-a
kapacitet TSC-a
frekvencije viših harmonika

α Thyristor firing angle
 σ Thyristor control angle
 i_{TCR} TCR current instantaneous value
 I_1 TCR current basic component
 I_n TCR current with higher harmonics considered
 X_L TCR reactance
 X_C TSC reactance
 V Effective value of connection voltage
 B_{TCR} TCR control susceptance
 B_C TSC susceptance
 ω Circular frequency
 n Harmonics ordinal number
 $v(t)$ TSC supply voltage
 L_{og} Inductance for TSC current restriction
 C_{isc} TSC capacity
 ω_n Higher harmonics frequency

α
 σ
 i_{TCR}
 I_1
 I_n
 X_L
 X_C
 V
 B_{TCR}
 B_C
 ω
 n
 $v(t)$
 L_{og}
 C_{isc}
 ω_n

6. LIST OF SYMBOLS

LITERATURA REFERENCES

- [1] Plavšić, T., Kuzle, I.: *Regulacija napona i jalove snage kao pomoćna usluga sustava*, Energija, Vol. 54 (2005), No 5, Pages 385 – 387.
- [2] Dizdarević, N.: *Mogućnosti povećanja prijenosne moći EES – a korištenjem konvencionalnih i FACTS naprava*, Energija, Vol. 50 (2001), No 5, Pages 323 – 348.
- [3] Padiyar, K. R.: *FACTS Controllers in power transmissions and distribution*, New Age International Publishers, New Delhi, 2007.
- [4] Grigsby, L. L.: *Power Systems*, Taylor & Francis Group LLC, Canada, 2007.
- [5] Study – “Energetski institute Hrvoje Požar”, Zagreb: *Metodologija i kriteriji za planiranje razvoja prijenosne mreže u uvjetima otvorenog tržišta električnom energijom*, Zagreb, 2002.

Primljeno / Received: 05.10.2010.

Prihvaćeno / Accepted: 28.10.2010.

Pregledni članak

Subject review

Adresa autora / Authors' address

Mateo Blasina, bacc. ing. el.
doc. dr. sc. Vitomir Komen, dipl. ing. el.
Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci
Vukovarska 58, 51000 Rijeka
HRVATSKA (CROATIA)
mblasina@gmail.com
vitomir.komen@hep.hr

Renato Ćučić, dipl. ing. el.
HEP-ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka
V. C. Emina 2, 51000 Rijeka
HRVATSKA (CROATIA)
renato.cucic@hep.hr