

## Značilnosti obratovanja črpalne hidroelektrarne Avče

Zvone Košnjek<sup>1</sup>, Valentin Ažbe<sup>2</sup>, Rafael Mihalič<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>ELEK svetovanje, d.o.o., Koprška ulica 88, 1000 Ljubljana, Slovenija

<sup>2</sup>Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: zvone.kosnjek@elek.si, valentin.azbe@fe.uni-lj.si, rafael.mihalic@fe.uni-lj.si

**Povzetek.** Članek obravnava črpalno elektrarno (ČE) Avče, in sicer njeno vključitev v 110 kV omrežje Severne Primorske, posledice zapletov pri obnovi daljnovoda skozi Renče, princip obratovanja dvojno napajanega motor-generatorja (DFMG), kakršen je vgrajen v ČE Avče, in analizo dinamičnega obnašanja DFMG, t. j. analizo tranzientne stabilnosti, obnašanja pri kratkih stikih in možnost otočnega obratovanja. Izračuni pretokov moči pri različnih stanjih omrežja kažejo, da ČE Avče brez daljnovodne povezave Sežana–Vrtojba tako rekoč ne more obratovati. Rezultati analize dinamičnega obnašanja kažejo, da je DFMG s stališča tranzientne stabilnosti bistveno manj problematičen kot sinhronski stroj, je pa obnašanje DFMG v dinamičnih razmerah močno odvisno od regulacije le-tega. Kratki stik v omrežju in temu sledeč padec napetosti na sponkah DFMG za stabilnost obratovanja tega stroja niti v generatorskem niti v motorskem režimu ni problematičen.

**Ključne besede:** dvojno napajani stroji, črpalne elektrarne, otočno obratovanje

## Operating Characteristics of the Avče Pump-Storage Power Plant

**Extended abstract.** Pump Storage Plants (PSPs) are foreseen to cover large part (in the range of a quarter) of the generating capacity in the Slovenian electric-power system. The paper deals with the Avče PSP from the perspective of the following issues: its connection to the 110-kV network and consequences of problems involved with the building of overhead lines through the town of Renče; operational principle of the doubly-fed motor-generator (DFMG); the DFMG dynamic behavior; and possibilities FOR island operation of the 110-kV network of the northern part of the Primorska region.

Power-flow calculations for various network states show that the foreseen reconstruction of the 110-kV Divača–Sežana–Vrtojba–Gorica and Gorica–Doblar overhead lines would enable full-scale operation of the Avče PSP. Fig. 1 shows the foreseen 110-kV network of the northern part of the Primorska region and Table I shows active powers flowing through the lines for various network states. However, lacking a connection between Sežana and Vrtojba, uneffected for being refused by the inhabitants of Renče, the Avče PSP is inoperable. The power flow for this state is presented in Table II with the overloaded overhead lines colored in gray.

As the DFMG technology is relatively new, the principle of its operation and advantages over synchronous machines are described in Section 3.

In Section 4, the DFMG dynamic behavior is analyzed. Our analysis of the DFMG transient stability shows that DFMG is less problematic than the synchronous machine.

Simulations of single-phase and three-phase faults show that unfavourable events on nodes of the DFMG Avče do not pose problems on stability neither in the turbine-nor in the pumping mode.

If the Avče PSP were to operate in the island mode, this would only be possible as a generator. Also frequency and voltage control should be performed and it should be optimized to respond various operating states. Fig. 7 presents a hypothetical situation to demonstrate that island operation is in principle possible provided that certain restrictions are taken into account.

**Keywords:** Doubly-fed machines, pump-storage power plants, island operation

### 1 Uvod

V Sloveniji so zgradili oz. še načrtujejo gradnjo velikih črpalnih elektrarn (ČE), katerih moč bo pomenila znaten delež inštaliranih proizvodnih zmogljivosti Slovenije. Naj omenimo nekatere vzroke za gradnjo ČE.

V Evropi smo se odločili za prehod v nizkoogljeno družbo, rezultat katere je sveženj predlogov za varstvo podnebja pod geslom „20-20-20 do 2020“. Ena od temeljnih postavk omenjene ideje je povečanje deleža obnovljivih energetskega virov z 8,5 na 20, v Sloveniji celo na 25 odstotkov v rabi končne energije. Razen cene same energije iz obnovljivih virov je ključnega pomena to, kako lahko sistem prenese stohastično proizvodnjo obnovljivih virov. Vprašati se je treba ali je to sploh tehnično mogoče oz. ekonomsko v sprejemljivih mejah.

Osnovni problem je nezmožnost elektroenergetskega sistema shraniti oz. imeti rezervo električne energije. Črpalne elektrarne so dandanes cenovno najsprejemljivejše sredstvo za skladiščenje velikih količin električne energije iz obnovljivih virov. V ZDA

imajo navado reči, "veter potrebuje plesnega partnerja". Skoraj idealen "plesni partner" za obnovljive vire so ravno omenjene črpalne elektrarne.

Po drugi strani tudi pri odločitvi za jedrsko opcijo sistem nujno potrebuje prilagodljive vire, ki so se sposobni prilagajati porabi in se hitro vključijo v obratovanje, posebno ob izpadih drugih virov. Jedrske elektrarne in elektrarne na premog za to namreč niso primerne, medtem ko plinske turbine to zmožnost imajo. Zelo pomembno vlogo pa lahko pri tem igrajo črpalne elektrarne.

Glede na navedeno bodo prilagodljivi viri energije v prihodnosti za zanesljivo obratovanje EES sistema Slovenije zelo potrebni, če ne nujni. ČE imajo lahko pri tem, povrh kot element sistema brez emisij v obratovanju, zelo pomembno vlogo pri zagotavljanju zanesljivega in stabilnega obratovanja sistema. To dejstvo se v Evropi zrcali v razmeroma velikem deležu ČE v sistemu.

Najboljše razpoložljive tehnike pri ČE med drugim zajemajo tudi t. i. dvojno napajane stroje za generatorsko–motorske režime obratovanja (Doubly Fed Motor Generator - DFMG) - ČE Avče je druga tovrstna elektrarna v Evropi. Gre za relativno novo tehnologijo na področju energetike, izkušenj z njimi še ni veliko.

## 2 Vključitev ČE Avče v 110 kV omrežje

Črpalne elektrarne so praviloma relativno velikih moči, zato potrebujejo dovolj močno povezavo s prenosnim elektroenergetskim sistemom. ČE Avče se vključuje v 110 kV sistem Severne Primorske, pri tem je pogoj za vključitev rekonstrukcija daljnovodov na relaciji Divača–Sežana–Vrtojba–Gorica in Gorica–Avče–Doblar, ki jih je sicer tudi ne glede na vključitev ČE Avče treba rekonstruirati v okviru že več kot 70 let obstoječih koridorjev v novi izvedbi kot dvosistemke daljnovode.

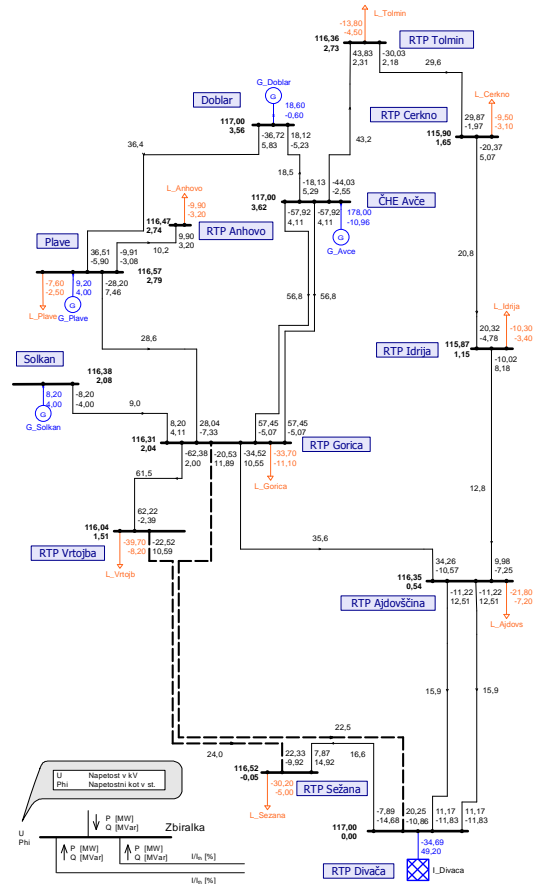
Pri gradnji daljnovoda Sežana–Vrtojba je prišlo do nasprotovanja obstoječemu koridorju v območju naselja Renče. Iskanje novega koridorja ni bilo uspešno, na obstoječem daljnovodu skozi Renče so med rekonstrukcijo preostalih odsekov daljnovoda izginili vodniki, montaža nadomestnih vodnikov na obstoječe stebre pa je tako kot postavitev novih dvosistemskih stebrov naletela na fizični odpor posameznih krajanov oziroma tako imenovane civilne pobude. Tako je daljnovod med Sežano in Vrtojbo prekinjen, omrežje Severne Primorske nima redundance po kriteriju izpadov n-1 in ČE Avče ne more normalno obratovati.

Zaplet pri obnovi daljnovoda skozi Renče je še eden v vrsti razlogov za pripravo novega intervencijskega zakona o vključevanju linijskih objektov v prostor, ki naj bi skrajšal postopke vključevanja v prostor za daljnovode — tako na distribucijskem kot na prenosnem omrežju — kot tudi za ceste in plinovode.

## 2.1 Predvideno omrežje ob vključitvi ČE Avče

Ob vključitvi ČE Avče v EES je bila glede na leto 2007 predvidena zamenjava enosistemskega 110 kV daljnovoda Divača–Sežana–Vrtojba–Gorica z dvosistemskim ter zamenjava enosistemskega 110 kV daljnovoda Gorica–Doblar z dvosistemskim in vzkanjanje ČE Avče.

Predvideno 110 kV omrežje ob vključitvi ČE Avče prikazuje slika 1. Elektrarna je v turbinskem režimu dimenzionirana za obratovanje med 110 in 180 MW in v črpalnem med 130 in 185 MW [1]. Na sliki so podani dnevni pretoki moči v turbinskem režimu obratovanja ČE Avče.



Slika 1: Predvideno 110 kV omrežje Severne Primorske

Figure 1: 110 kV network foreseen for the northern part of the Primorska region.

V tabeli I so podani pretoki moči po daljnovodih za posamezna obratovalna stanja. Sivo pobarvano polje prikazuje obremenitev daljnovoda prek njegove nazivne prenosne zmogljivosti, torej ČE Avče podnevi ob minimalni proizvodnji preostalih hidroelektrarn v črpalnem režimu z nazivno močjo ne more obratovati.

Tabela I: Pretoki moči po DV za različna obratovalna stanja – predvideno stanje omrežja

Table I: Power flows over lines at various operating states – future configuration of the network

	P / MW				
	Podnevi, turbinski režim	Podnevi, turbinski r., max. proizvod.	Podnevi, črpalni r., min. proizvod.	Ponoči, črpalni režim	Ponoči, turbinski r., max. proizvod.
Divača – Ajdovšč.	-11,2	-34,3	84,2	73,1	-45,9
Divača – Ajdovšč.	-11,2	-34,3	84,2	73,1	-45,9
Divača - Gorica	-20,5	-44,9	78,3	69,5	-54,1
Divača - Sežana	7,9	-17,8	109,6	91,8	-36,3
Sežana - Vrtojba	-22,3	-48,0	78,6	70,2	-57,5
Gorica - Vrtojba	62,4	88,9	-36,9	-40,8	86,8
Gorica – Ajdovšč.	34,5	68,1	-87,5	-91,0	78,2
Gorica - Avče	-57,5	-75,5	64,3	63,4	-77,6
Gorica - Avče	-57,5	-75,5	64,3	63,4	-77,6
Gorica - Plave	-28,2	-53,5	40,2	38,9	-56,9
Avče - Doblar	18,1	-33,2	-28,1	-26,2	-35,0
Avče - Tolmin	44,0	58,2	-19,6	23,3	56,0
Plave - Doblar	-36,7	-36,8	25,3	26,4	-34,8
Tolmin - Cerknjo	30,0	44,4	-33,5	-33,0	45,9
Cerkno - Idrija	20,4	34,5	-43,2	-40,0	38,9
Idrija - Ajdovščina	10,0	24,1	-53,8	-47,3	31,5

## 2.2 Trenutno stanje omrežja

Zaradi zapletov pri zamenjavi enosistemskega daljnovođa Divača–Sežana–Vrtojba–Gorica z dvosistemskim na odseku med Sežano in Vrtojbo ni dokončan, torej se Severno Primorska zanka 110 kV omrežja napaja le po dvosistemskem daljnovođu Divača–Ajdovščina. Izračunani pretoki po vodih so prikazani v Tabeli II. Daljnovođi, ki so preobremenjeni, so v tabeli označeni s sivo barvo. Kot je razvidno, je najbolj preobremenjen daljnovođ Gorica–Ajdovščina.

Tabela II: Pretoki moči po DV za različna obratovalna stanja – izračun za trenutno stanje omrežja

Table II: Power-flows via the lines for various operating conditions – calculation for the current network

	P / MW				
	Podnevi, turbinski režim	Podnevi, turbinski r., max. proizvod.	Podnevi, črpalni r., min. proizvod.	Ponoči, črpalni režim	Ponoči, turbinski r., max. proizvod.
Divača–Ajdovščina	-32,1	-78,7	169,7	148,2	-98,6
Divača–Ajdovščina	-32,1	-78,7	169,7	148,2	-98,6
Divača–Gorica	-	-	-	-	-
Divača–Sežana I+II	30,2	30,2	30,2	21,1	21,1
Sežana–Vrtojba	-	-	-	-	-
Gorica–Vrtojba I+II	39,7	39,7	39,7	27,8	27,8
Gorica–Ajdovščina	68,1	142,4	-204,9	-184,5	167,8
Gorica–Avče	-53,5	-67,0	50,8	51,3	-67,4
Gorica–Avče	-53,5	-67,0	50,8	51,3	-67,4
Gorica–Plave	-26,3	-49,4	32,9	32,5	-51,9
Avče–Doblar	16,3	-37,5	-21,0	-19,9	-40,1
Avče–Tolmin	53,8	80,2	-53,4	-53,4	82,0
Plave–Doblar	-34,7	-32,3	18,1	20,0	-29,7
Tolmin–Cerkno	39,7	65,7	-67,6	-63,5	71,6
Cerkno–Idrija	29,9	55,4	-78,1	-71,0	64,0
Idrija–Ajdovščina	19,5	44,8	-89,2	-78,8	62,2

Zaradi preobremenjenosti daljnovođov obratovanje ČE Avče pri nazivnih močeh ni mogoče. V tabeli III so prikazane teoretične moči ČE Avče za različna obratovalna stanja, pri katerih meja obremenljivosti daljnovođov (t. j. 96 MW) ni presežena. Najmanjša mogoča moč črpalnih elektrarn je omejena z obratovalnim območjem turbine. V tabeli III so

teoretične moči, ki so manjše od dejansko mogočih moči ČE Avče, obarvane sivo. Kot je razvidno iz te tabele, v obratovalnih stanjih v črpalnem režimu obratovanje ČE Avče ni mogoče.

Tabela III: Največja dovoljena moč ČE Avče

Table III: Upper-limit power of the Avče PSP

	P / MW				
	Podnevi, turbinski režim	Podnevi, turbinski r., maks. proizvod.	Podnevi, črpalni r., min. proizvod.	Ponoči, črpalni režim	Ponoči, turbinski r., maks. proizvod.
Moč ČE Avče	178	112	-17	-47	72

Vzrok za omejitev v moči ČE Avče je premajhna zmožnost prenosa energije med 400 kV prenosnim sistemom iz RTP Divača in 110 kV omrežjem Severne Primorske, ker ni zgrajena daljnovođna povezava Sežana–Vrtojba (oz. ni dokončana zamenjava enosistemskega daljnovođa z dvosistemskim). Možnost obratovanja ČE Avče je zato pogojena z razmerami v 110 kV omrežju, t. j. od proizvodnje preostalih HE in od porabe.

S simulacijami pretokov moči lahko ugotovimo, da je turbinski režim obratovanja mogoč pri polni moči ČE le, če preostale HE niso na maksimalni moči. Pri maksimalni moči preostalih HE se največja dovoljena moč ČE glede na tabelo III pri dnevni porabi zniža na 112 MW. Kolikor se zmanjša proizvodnja HE in kolikor se poveča poraba, za približno toliko se lahko poveča proizvodnja ČE.

Črpalni režim obratovanja bi bil v trenutnem stanju 110 kV omrežja mogoč le ob podpori preostalih HE; ponoči morajo proizvajati dodatnih 80 MW, da bi ČE lahko obratovala pri 130 MW. Tako obratovanje seveda ni smiselno in bi lahko bilo izvedeno le za testiranje.

Brez daljnovođne povezave Sežana–Vrtojba ČE Avče smiselno tako rekoč ne more obratovati, kar zahteva nujne rešitve pri daljnovođnih povezavah. Na daljši rok bi bila najbolj smiselna umestitev ČE Avče v načrtovano 400 kV povezavo med Slovenijo in Italijo.

## 3 Agregat ČE Avče

### 3.1 Zakaj dvojno napajani stroji v črpalnih hidroelektrarnah?

Kot rečeno ima ČE Avče motor tipa DFMG. Podajmo najprej nekaj argumentov v zvezi z odločitvijo za tovrstno tehnologijo.

Uporaba dvojno napajanih asinhronskih strojev (DFMG - Doubly Fed Motor Generator) se je povečala predvsem zaradi razvoja sodobnih vetrnih elektrarn. Izkazalo se je, da je tako mogoče prilagajati hitrosti vrtenja rotorja (vetrnice) hitrosti vetra tako, da je izkoristek največji. Načeloma je to mogoče doseči tudi z generatorjem, ki je povezan z omrežjem preko frekvenčnega pretvornika. Bistvena razlika med tako rešitvijo in rešitvijo z dvojno napajanim asinhronskim strojem je v dimenzioniranju frekvenčnega pretvornika. Če napajamo prek pretvornika stator, mora biti

pretvornik dimensioniran na navidezno moč motorja, pri DFMG pa s pretvornikom napajamo samo rotor stroja. Moč, ki se pri DFMG pretaka med rotorjem in omrežjem, je odvisna od slipa in je v ozkem območju okrog nazivnih vrtljajev bistveno manjša od moči, ki se prenaša v prej omenjenem primeru prek pretvornika, priključenega na statorsko navitje. Pri vetrnih elektrarnah je pretvornik DFMG dimensioniran na približno tretjino moči agregata.

Izkazalo se je, da ima ta tehnologija nekatere prednosti pred klasičnim sinhronskim generatorjem tudi pri črpalnih hidroelektrarnah. Prvi tovrstni agregat v Evropi je bil vgrajen v ČE Goldisthal v Nemčiji (2003) [3]. Nekateri razlogi za odločitev za izvedbo z DFMG so bili zlasti:

- Boljši izkoristek kot pri klasičnih rešitvah, saj se lahko s tovrstnim strojem prilagajajo želeni moči in padcu tako, da je izkoristek največji.
- Pri pogostem prilagajanju obremenitve potrebam v sistemu (primarna oz. sekundarna regulacija) je glede na izkušnje [3] pričakovati povečanje izkoristka ČE za 15 % v primerjavi s klasično ČE s sinhronskim strojem. Medtem ko se s spremembo padca (napolnjenost bazena) spreminja tudi moč sinhronskega agregata (razen če vzamemo v zakup močno povečanje izgub), je z DFMG mogoče brez bistvenih sprememb izkoristka regulirati moč v določenih mejah.
- Dinamično je DFMG ob motnjah v sistemu manj izpostavljen nestabilnemu obnašanju kot sinhronski stroj, ki je fiksno vezan na frekvenco. Seveda je obnašanje DFMG v dinamičnih razmerah močno odvisno tudi od regulacije le-tega.
- DFMG lahko hitreje sinhroniziramo na omrežje, ker ni potrebno natančno prilagajanje hitrosti vrtljajev omrežni frekvenci (reda 10 s hitreje).

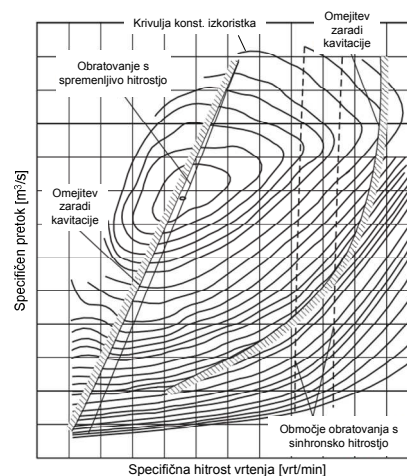
Za ilustracijo podajamo školjčni diagram ČE na sliki 2.

### 3.2 Osnovne lastnosti agregatov DFMG

V nadaljevanju je opisan osnovni princip delovanja DFMG. Rotor DFMG je povezan s turbino prek skupne osi. Stator je priključen direktno na omrežje, rotor pa preko drsnih obročev na pretvornik, ki regulira amplitudo in kot napetosti na rotorju ter tako omogoča regulacijo delovne in jalove moči. Osnovna shema DFMG je slika 3. Moč, ki se pretaka po rotorju je definirana kot:

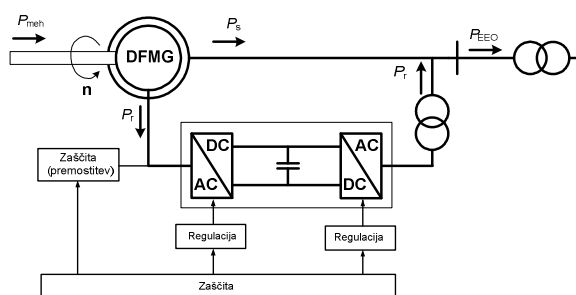
$$P_r \approx slip * P_s \quad (1)$$

Glede na (1) je v bližini sinhronskih vrtljajev moč, ki teče preko pretvornika v mrežo, majhna. DFMG lahko načeloma proizvaja oz. porablja poljubno delovno in jalovo moč pri poljubnem slipu (v obratovalnem območju), pri tem pa mora mehanski moment ustrezati električnemu momentu. Ko DFMG sklopimo s turbino, električno delovno moč DFMG določa karakteristika mehanske moči turbine glede na hitrost vrtenja.



Slika 2. Principialni obratovalni diagram črpalne turbine s spremenljivo hitrostjo vrtenja [4]

Figure 2. Basic turbine operating diagram for variable speed regime [4]



Slika 3: Shema dvojno napajanege stroja

Figure 3: Scheme of the doubly-fed machine

Glede na (1) in glede na sliko 3 lahko shematično predstavimo odvisnosti pretokov moči v DFMG od dovedene mehanske moči. Pretoki moči v DFMG, katerega rotor je sklopljen s turbino z linearno odvisnostjo delovne moči glede na vrtljaje, prikazuje slika 4. Izgube pretvornika in transformatorja zanemarimo. Pri tem pomeni:

$P_r$  - moč, ki se pretaka po rotorju in pretvorniku v omrežje (EEO),

$P_{meh}$  - mehanska moč na osi stroja,

$P_s$  - moč, ki se pretaka po statorju v omrežje,

$P_{EEO}$  - moč DFMG, ki se pretaka v omrežje,

$n$  - vrtljaji,

$n_{sin}$  - sinhronski vrtljaji.

Pretvornik AC/DC na rotorski strani omogoča razklopitev regulacije elektromehanskega momenta in vzbujanja stroja, pretvornik na omrežni strani pa obratuje po principu razklopitve izmenjave delovne in jalove moči, ki jo izmenjuje z omrežjem.

Tako je mogoče regulirati delovno in jalovo moč statorja (ob določenih vrtljajih) oz. vrtljaje in jalovo moč statorja (ob določeni delovni moči statorja) ter delovno in jalovo moč rotorja. Pri tem naj omenimo, da je za zaščito pretvornika v rotorskem tokokrogu

predvidena premostitev z uporabo in polprevodniškimi stikalom. V literaturi je ta funkcija označena kot »Crowbar control«. V regulacijo pretvornika je vgrajena tudi vrsta drugih zaščitnih funkcij, vendar ta tematika presega okvir članka.

#### 4 Analiza dinamičnega obnašanja agregata ČE Avče

V literaturi so modeli regulacije agregatov DFMG že opisani. Tudi uporabljen simulacijski program vsebuje interno regulacijo pretvornika. Kljub temu zaradi pomanjkanja ustrezne literature izdelava modela ni trivialna naloga. Izdelani model (oz. bolje rečeno, model regulacije) ima naslednje lastnosti oz. module:

- model turbine,
- model cevovoda,
- regulacija hitrosti zapiranja vodilnika,
- regulacija delovne moči,
- regulacija jalove moči,
- zaščita "crowbar",
- omejitev izhodne napetosti pretvornika,
- statika,
- regulacija napetosti,
- frekvenčna regulacija,
- regulacija slipa po optimalni krivulji.

Vse opisano mora seveda delovati v generatorskem in motorskem režimu, ki pa se po logiki delovanja v nekaterih elementih močno razlikujeta. Moč agregata se namreč v motorskem obratovanju regulira s hitrostjo vrtenja po karakteristiki turbine in ne z vodilnikom kot pri generatorskem načinu. Pri tem vodilnik le zagotavlja optimalni izkoristek. Ta model smo vključili v model

EES Slovenije, ki ga uporabljamo za analize dinamike pri trenutnem in stabilnostnem načinu simulacije.

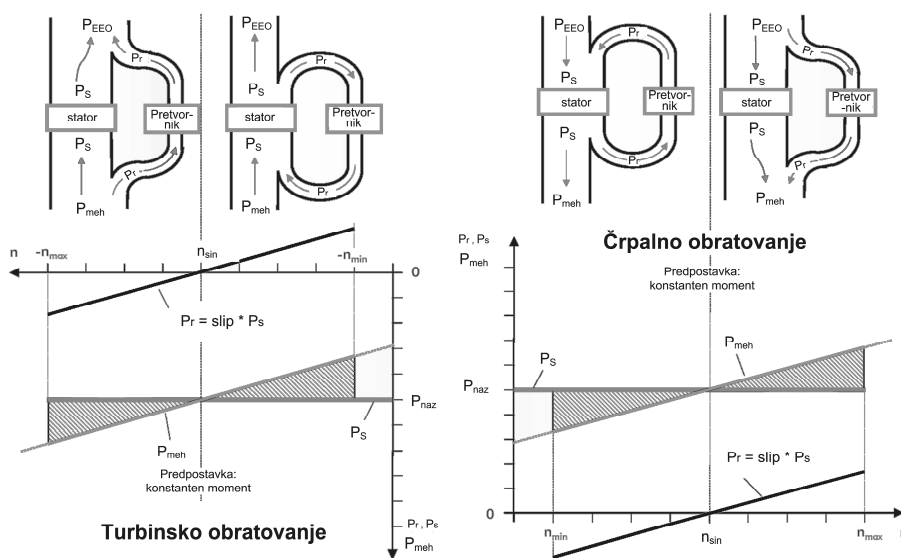
#### 4.1 Analiza tranzientne stabilnosti

Za izračun tranzientne stabilnosti agregatov smo skušali najti najbolj neugodne scenarije glede na lokacijo kratkostične okvare in izklop voda v okvari. Kot najbolj kritične okvare smo izbrali tiste, ki so čim bližje agregatu, ki ga opazujemo, vendar ne povzročijo ločitve agregata iz omrežja.

Osnovni namen izračuna tranzientne stabilnosti lahko prevedemo na določitev maksimalnega časa motnje (CCT – Critical Clearing Time), ki ga sistem oz. analizirani stroj še ravno prenese, da ne pade iz sinhronizma.

Izkazalo se je, da DFMG ob tripolni okvari na zbiralkah in izklopu voda ČE Avče–RTP Gorica sploh ni kritičen. Ob daljši okvari ne predstavlja problema sinhronizem DFMG, pač pa izpadejo iz sinhronizma sinhronski stroji v električni bližini, kar ilustrira slika 5.

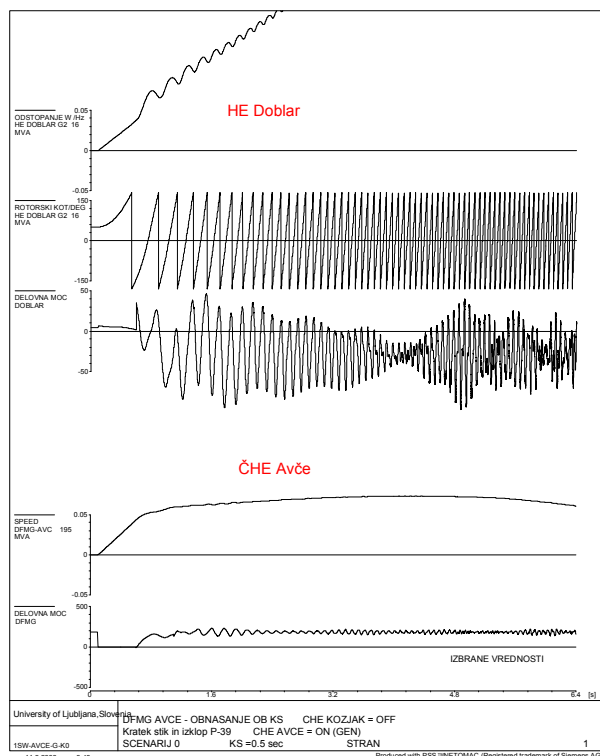
Izkazalo se je, da je DFMG s stališča tranzientne stabilnosti bistveno manj problematičen kot sinhronski stroj, saj rotor ni togo vezan na vrtilno polje statorja. Kot vidimo je obnašanje agregata v resnici zelo pohlevno in ne vzbuja nihanj v sistemu, ker lahko delovno moč po vrnitvi napetosti obdrži na konstantni vrednosti brez večjih prenihanj. Regulacija slip čez čas vrne na začetno vrednost. Iz slike 5 je razvidno, da kljub izpadu bližnjih agregatov iz sinhronizma DFMG oddaja moč, ki pa nekoliko niha okoli nastavljenih vrednosti zaradi nihanja omrežja. Razmere so podobne v motorskem obratovanju. Edino omejitev pri dolžini okvare predstavljajo meje pretvornika.



Slika 4: Pretoki moči DFMG  
Figure 4: DFMG power flow

## 4.2 Analiza obnašanja agregata ob okvarah

Da bi ugotovili lastnosti agregata ČE Avče glede stabilnosti in vpliva na sistem smo izvedli obsežne simulacije 1-polnih kratkih stikov z uspešnim oz. neuspešnim APV za motorske in generatorske načine obratovanja. Enako je bilo izvedeno za 3-polne napake, pri čemer APV seveda ni aktiven.



Slika 5: Odziv ČE Avče na motnjo 500 ms; obrati (p.u.- 1. in 3. diagr.) in moč ČE (2. in 4. diagr.)

Figure 5: Avče PSP response to a 500 ms fault; speed (p.u.- 1. and 3. diagr.) and power (2. and 4. diagr.)

Izkazalo se je, da stabilnost obratovanja ČE Avče ob nastopu enopolnega zemeljskega stika, v omrežju, ki mu sledi bodisi uspešen APV ali neuspešen APV in izklop voda v okvari ni ogrožena. To velja za generatorski in motorski način obratovanja.

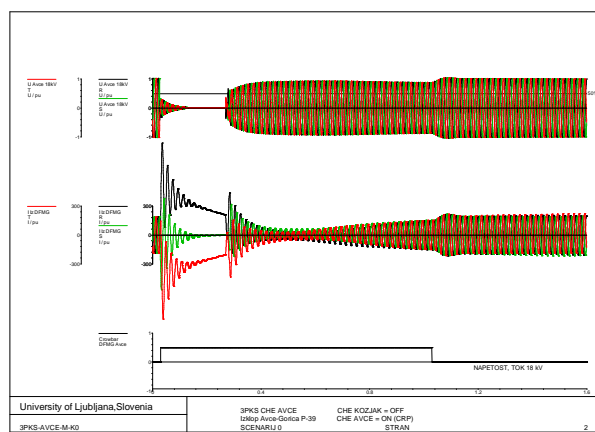
Podobno velja za tripolne napake. Glede na izvedene izračune sklepamo, da tripolni kratki stik v omrežju in posledični padec napetosti na sponkah DFMG za stabilnost obratovanja tega stroja niti v generatorskem niti v motorskem režimu ne pomeni problema.

Pokazalo se je, da prekratki časi delovanja zaščite "crowbar" po pravilu privedejo do razmer, ko so izpolnjeni pogoji za njeno ponovno aktiviranje. Zato je smiselno nastaviti čas njenega delovanja na ustrezno višje vrednosti.

Za ilustracijo podajamo na sliki 6 od zgoraj navzdol napetosti vseh treh faz, toke agregata in signal zaščite "crowbar" za primer 3-polne okvare.

## 4.3 Možnost otočnega obratovanja

Za proučitev možnosti otočnega obratovanja primorske zanke smo izbrali generatorsko obratovanje ČE Avče. Težko si je namreč predstavljati otočno obratovanje območja Primorske (ki v izbranem scenariju z generatorji HE Solkan, HE Plave in HE Doblar ne more pokrivati niti porabe) in motorsko obratovanje ČE Avče. Po drugi strani je EES Primorske relativno majhen glede na moč ČE Avče, kar za zagotovitev stabilnega obratovanja pomeni težke razmere.



Slika 6: 3PKS, motorsko obratovanje, razmere na 18 kV nivoju RTP Avče,  $T_{crow}=1.0s$

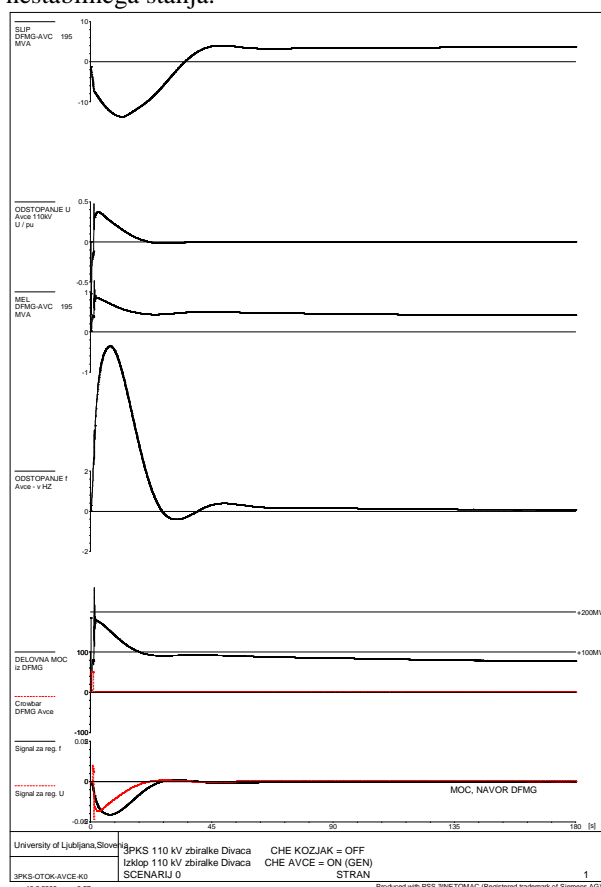
Figure 6: 3p SC, pump operating mode, states on the 18 kV level of the Avče RTP,  $T_{crow}=1.0s$

Po izbranem scenariju nastopi kratek stik na 110 kV zbiralkah Divača in vsi vodi se izklopijo (2 x Divača–Ajdovščina, Divača–Gorica in Divača–Sežana). Generator ČE Avče ima aktivirano frekvenčno regulacijo, preostali generatorji na Primorskem pa obratujejo s konstantno odprtim vodilnikom ("vozijo moč").

Brez reakcije agregata ČE Avče frekvenca zelo hitro naraste izven vseh sprejemljivih meja. Ker se obenem močno spremeni tudi napetost, z dodatno vejo v regulatorju konverterja lahko poskrbimo tudi za regulacijo le-te. Seveda bi bilo treba za optimalen odziv sistema na regulacijo frekvence in napetosti regulacijske člene optimirati glede na različna obratovalna stanja (časovne konstante regulatorjev, ojačanje regulatorjev).

Najpomembnejše veličine prikazuje slika 7. Glede na zajeto široko časovno območje (180 s) so bili izračuni izvedeni v stabilnostnem načinu. Od zgoraj navzdol so prikazani: odstopanje vrtiljajev DFMG od začetnih, odstopanje napetosti od začetne na 110 kV zbiralkah ČE Avče, električni moment DFMG, odstopanje frekvence od 50 Hz, delovna moč iz DFMG, ki zaradi regulacije frekvence ustrezno upade, signal zaščite "crowbar" ter signala za regulacijo frekvence in napetosti. Vidimo, da bi morala moč DFMG upasti na približno 80 MW.

Glede na predstavljene rezultate sklepamo, da se teoretično EES Severne Primorske lahko obdrži v otočnem obratovanju pri izpadu RTP Divača. Če Avče lahko k temu bistveno pripomore in zagotovi napajanje vseh porabnikov. Seveda pa je treba ustrezno izbrati parametre frekvenčne in napetostne regulacije DFMG, da ne bi prišlo do nestabilnih obratovalnih stanj otočnega sistema. Simulacije so pokazale (na tem mestu jih ne navajamo), da so neprimerna ojačenja regulatorjev lahko relativno hitro vzrok za nastop nestabilnega stanja.



Slika 7: 3PKS na 110 kV zbiralkah RTP Divača in prehod v otok ( $T_{\text{crow}}=1.0\text{s}$ , U-reg. aktivirana)

Figure 7: 3p SC on the 110 kV bus of the Divača substation and transition to island operation ( $T_{\text{crow}}=1.0\text{s}$ , voltage control activated)

## 5 Sklep

Tehnologija dvojno napajanih strojev je relativno nova, obratovne lastnosti tovrstnih agregatov so v našem prostoru relativno slabo poznane. Glede na to, da bo po načrtih proizvodnih podjetij v EES zgrajenih več črpalnih elektrarn s tovrstno tehnologijo je poznavanje te tehnologije še toliko pomembnejše.

Prednost Če z dvojno napajanimi stroji je predvsem izkoristek, ki je večji kot pri Če s sinhronskim strojem.

Izvedene študije vključitve Če Avče v EES Slovenije so pokazale, da je DFMG s stališča

tranzientne stabilnosti bistveno manj problematičen kot sinhronski stroj, saj rotor ni togo vezan na vrtilno polje statorja. Seveda je obnašanje DFMG v dinamičnih razmerah močno odvisno tudi od regulacije le-tega. DFMG lahko hitreje sinhroniziramo na omrežje, ker ni potrebno natančno prilagajanje hitrosti vrtiljajev omrežni frekvenci. Kratki stik v omrežju in posledični padec napetosti na sponkah DFMG za stabilnost obratovanja tega stroja niti v generatorskem niti v motorskem režimu ni problem.

Seveda pa je pogoj za normalno obratovanje Če Avče dokončanje obnove daljnovidov 110 kV omrežja Severne Primorske oziroma v prihodnosti vključitev v 400 kV omrežje.

## 6 Literatura

- [1] Stacionarne in dinamične razmere ob vključitvi Če Avče v elektroenergetsko omrežje Slovenije, ELEK, 2007.
- [2] G. G. Alstom, "Evolution of Pump Storage Technology," elektronski vir: [lme.epfl.ch/wbdbav/site/lme/users/wetter/private/pdf\\_divers/cigre/posters/EvolutionPump.pdf](http://lme.epfl.ch/wbdbav/site/lme/users/wetter/private/pdf_divers/cigre/posters/EvolutionPump.pdf), 2008.
- [3] U. Voight, "Die Drehzahleregellen 265-MW-Pumpspeichersätze des PSW Goldisthal," *VGB PowerTech*, 1/2 of 2005, pp 77–81, 2005.
- [4] Landolt-Börenstein Online, "Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, Group VIII – Advanced Materials and Technologies, Volume 3C – Renewable Energy" pp 626, 2006.

**Zvone Košnjek** je diplomiral leta 1990 in magistriral leta 1993. Redno je zaposlen v svetovalnem podjetju ELEK, medtem ko od leta 1990 deluje tudi kot pedagoški delavec na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, do leta 1999 kot asistent, nato kot višji predavatelj. Opravljal je svetovalne storitve s področja tehnologij proizvodnje električne energije in razvoja EES za znana podjetja in ustanove tako v RS kot v tujini, med njimi tudi za Svetovno banko in Združene narode.

**Valentin Ažbe** je diplomiral leta 1996, magistriral leta 2003 in doktoriral leta 2005 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Leta 2000 se je zaposlil na Fakulteti za elektrotehniko kot mladi raziskovalec. Raziskovalno delo opravlja v Laboratoriju za preskrbo z električno energijo. Od leta 2005 je zaposlen kot asistent na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Ukvarja se z analizo elektroenergetskih sistemov in naprav FACTS.

**Rafael Mihalič** je diplomiral leta 1986, magistriral leta 1989 in doktoriral leta 1993 na Fakulteti za elektrotehniko in računalništvo v Ljubljani. Po diplomi je postal asistent na omenjeni fakulteti na Katedri za elektroenergetske sisteme in naprave. Med letoma 1988 in 1991 je bil zaposlen pri SIEMENS AG Erlangen na inštitutu za razdeljevanje električne energije in načrtovanje omrežij. Od leta 2005 je redni profesor na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Je član CIGRE, član IEEE, predsednik ŠK B4 SLOKO CIGRE. Področje delovanja vključuje predvsem analizo elektroenergetskih sistemov in naprav FACTS.