

# Model Flores za optimizacijo proizvodnje električne energije na dereguliranem trgu

**Zvonko Bregar**

*Elektroinštitut Milan Vidmar, Hajdrihova 2, 1000 Ljubljana, Slovenija*  
*E-pošta: zvonko.bregar@eimv.si*

**Povzetek.** Delno celoštevilčno linearno programiranje (ang. mixed integer linear programming MILP) se v zadnjem času čedalje bolj uveljavlja pri optimizaciji ponudbe posameznih proizvodnih podjetij na trgu električne energije [1, 2]. Pri tem pristopu predpostavimo poznavanje vseh tehničnih karakteristik obravnavanega sistema (npr. verige hidroelektrarn HE), poznavanje trenutnega stanja sistema (npr. stanja regulacijskih bazenov), napoved vrednosti sistemu eksternih dejavnikov (npr. dotokov v bazene po urah) in še napoved cen [8] električne energije za naslednji dan. Podobno kot pri navadnem linearnem programiranju (LP) izrazimo vse tehnične omejitve obratovanja opazovanega sistema kot množico linearnih enačb in neenačb, kriterij optimizacije pa je maksimum dobička. Pri tem so pri MILP nekatere spremenljivke lahko tudi celoštevilčne, s čimer veliko bolje prikažemo realne razmere kot pri navadnem LP. Pri uporabi MILP se navadno ne ukvarjamo z načinom reševanja, temveč zadostuje uporaba komercialnih optimizacijskih paketov, saj so v zadnjem času razvili številne nove metode kombinatorične optimizacije, hkrati pa se v računalnikih stalno povečujeta tako hitrost delovanja procesorjev kot tudi velikost pomnilnikov. Članek predstavlja nov model MILP Flores, ki smo ga razvili na Elektroinštitutu Milan Vidmar za simulacije podajanja ponudb kratkoročno in dolgoročno na trgu električne energije. Teorijo modela smo povzeli po lastnem modelu PRAK [17], ki obravnava mogoče proizvodnje verig HE, organizacijo dela pa po splošnoenergetskem LP modelu MESSAGE [18] Mednarodne agencije za jedrsko energijo. Za ilustracijo smo v članku prikazali rezultate modela Flores za primer obratovanja verige HE na Soči, vključujoč tudi načrtovano črpalno elektrarno Avče na trgu EEX v Nemčiji [14] in tedenski cikel obratovanja rehabilitirane HE Moste II+III [15].

**Ključne besede:** delno celoštevilčno linearno programiranje, mogoča proizvodnja hidroelektrarn, veriga hidroelektrarn, dolgoročno planiranje v elektroenergetiki, trg električne energije

## The Flores mixed integer linear programming model for the optimal response of hydro cascades in the electricity spot market

### Extended abstract.

Mixed integer linear programming (MILP) models have in the last decade gained considerable interest in simulation of deregulated electricity markets [1, 2]. They are based on an in-depth knowledge of all relevant technical characteristics (for example a cascade of hydro power plants), of the current state (for example the regulating basins states), and the forecast of external parameters (for example the 24 hours inflows forecast) of the system under study, and the hour-by-hour forecast of the electricity marginal price for the following day [8]. Similar as in the lin-

ear programming (LP) models, in MILPs, too, all technical operation limitations are expressed as a set of linear equations and inequations. The optimization function in MILPs remains linear and is usually expressed as the maximum of the expected revenue from the electricity market. It is very important to note that some variables in MILPs can be of the integer type which allows far better modelling of system technical characteristics than in LPs. When applying MILPs, one does not usually do the math since it suffices to use the available computer solvers. This paper presents the theory of the new MILP Flores model that has been developed at the Milan Vidmar Electric Power Research Institute. It is based on the Institute's PRAK model that calculates the hy-

dro cascades production [17]. The *know-how* follows the general LP energy flow MESSAGE model of the International Atomic Energy Agency [18]. Two examples are added: the cascade of three existing run-of-river plants on the Soča river including the new pumping hydro plant Avče [14] and the weekly-cycle cascade of the two rehabilitated plants Moste II+III on the upper Sava river [15].

**Key words:** mixed integer linear programming, hydro productibility, cascades of hydro power plants, electricity market, hydro pumping plants

## 1 Uvod

Delno celoštevilčno linearno programiranje (mixed integer linear programming MILP) se v zadnjem desetletju čedalje bolj uporablja pri modeliranju in simulacijah elektroenergetskih sistemov in pri določanju ponudbe proizvodnih enot na trgu električne energije [1, 2]. Kot pri linearnem programiranju (LP) je tudi pri MILP kriterijska funkcija linearna, vendar pa so slednji modeli zaradi svoje zmožnosti vključitve celoštevilskih ( $\mathbb{Z}$ ) spremenljivk veliko zmogljivejši. Številni uporabni problemi namreč naravno zahtevajo, da zavzamejo nekatere spremenljivke le diskretne  $\mathbb{Z}$ -vrednosti. Dodatno je s pomočjo  $\mathbb{Z}$ -spremenljivk mogoče zelo natančno aproksimirati tudi nelinearne funkcije tehničnih karakteristik termoelektrarn (TE) in hidroelektrarn (HE) kot vsoto preprostejših funkcij.

Zaradi  $\mathbb{Z}$ -spremenljivk spadajo MILP s stališča teorije rešljivosti v množico kombinatoričnih oziroma nepolinomskih problemov, ki jih je veliko težje reševati kot LP. Zadnja desetletja pa so prinesla zelo širok razvoj operacijskih raziskav in numeričnih metod. Hkrati se nenehno povečujeta tudi procesorska hitrost in velikost pomnilnikov navadnih PC računalnikov. Tako je na trgu množica odličnih optimizacijskih programov za MILP, nekateri celo kot *odprta koda*.

V številnih novejših raziskavah s področja trga električne energije [1, 2, 3] prepuščajo matematično plat optimizacijskim programom. Taka dispozicija je velika prednost, saj se ni treba ukvarjati z matematičnimi podrobnostmi takšnih in drugačnih optimizacijskih metod, temveč se lahko posvetimo vsebinskim vprašanjem ustrezne oziroma čim boljše predstavitve tehnoloških karakteristik obravnavanega sistema. Naloga je le zapisati problem v matematični obliki, tako da bo dovolj korektno prezentiral realni sistem.

Po drugi strani pa nekatere raziskave [5, 6, 7] še vedno iščejo optimalno rešitev tudi s hkratnim

programiranjem optimizacijske metode. Gre predvsem za zelo obsežne probleme [4], ki jih ni mogoče neposredno reševati s komercialnimi programi, ker bi obdelave trajale nedopustno dolgo. Z upoštevanjem posebnosti modela, ki ga rešujemo v optimizacijskem procesu, je mogoče doseči smiselne obdelovalne čase. Pri tej optimizaciji se največkrat uporablja Bendersova dekompozicija, ki prevede originalni MILP na dva ločena programa: prvi vsebuje le  $\mathbb{Z}$ -spremenljivke, drugi pa je navadni LP in zato nima  $\mathbb{Z}$ -spremenljivk. Prvi problem je glavni problem in določa reševanje drugega problema, ki je v tem pogledu podproblem. Po Bendersu reševanje obeh problemov ponavljamo, pri čemer na vsakem koraku v celoštevilčni problem dodamo eno omejitev, ki jo sestavimo iz rešitve podproblema v prejšnjem koraku.

## 2 Model Flores

Na Elektroinštitutu Milan Vidmar smo razvili majhen, razmeroma preprost, a učinkovit model MILP za kratkoročno optimizacijo ponudb proizvodnih enot na trgu električne energije. Teorija modela bo razložena v naslednjem poglavju, tehnologijo reševanja smo povzeli po modelu MESSAGE-IV Mednarodne Agencije za jedrsko energijo na Dunaju (International Atomic Energy Agency IAEA), ki je namenjen za simulacijo in optimiranje pretokov v splošnih energetskih sistemih [18]. Vsebino problema, ki ga rešuje model Flores, pa smo povzeli po lastnem modelu PRAK, ki je bil v zadnjem času bistveno prenovljen in ki določa mogočo proizvodnjo verige pretočnih elektrarn z majhnimi regulacijskim bazeni na isti reki [17]. Način reševanja je naslednji: najprej model Flores zapiše problem optimalne sestave ponudbe na trgu električne energije standardizirani obliki, ki jo zahteva program za optimizacije GLPK ([20]), nato pa se izvedejo rutine matematične optimizacije v programu GLPK, ki vsebujejo tudi LP in MILP.

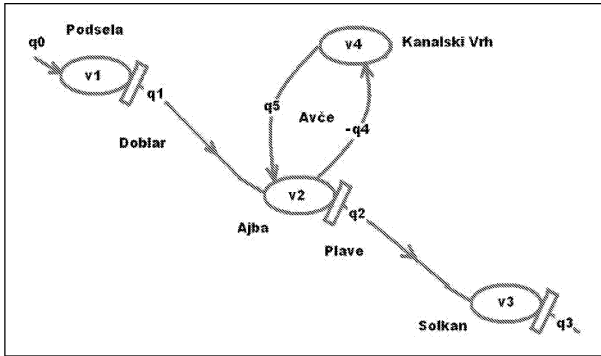
## 3 Model

Izračun modela Flores poteka po stolpcih širine ena ura. Pri obravnavi dnevnega trga električne energije navadno predpostavimo 24 urnih stolpcev, pri obravnavi tedenskega cikla pri HE z večjimi regulacijskimi bazeni pa 168 ( $= 24 \times 7$ ) urnih stolpcev.

Hidrološko povezani\* sistem HE (SHE), na primer verigo oziroma kaskado HE, najprej prikažemo v obliki preprostega usmerjenega grafa pretokov. Voz-

\*Model Flores je mogoče uporabiti tudi na sistemih hidrološko nepovezanih HE in na sistemih, ki vključujejo tako HE kot TE. Tak primer je proizvodno podjetje, sestavljeno iz raznolikih proizvodnih enot, ki enotno nastopa na trgu električne energije.

lišča v tem grafu ustrezajo regulacijskim bazenom, povezave oziroma usmerjene daljice pa ustrezajo pretokom skozi turbine ali prelivom. Slika 1 prikazuje SHE na reki Soči, ki je sestavljena iz treh obstoječih pretočnih HE (Doblar, Plave in Solkan) in načrtovane ČE Avče.



Slika 1. Poenostavljeni graf verige treh obstoječih pretočnih HE na Soči, vključujoč tudi načrtovano ČE Avče  
 Figure 1. Graph presenting the Soča hydro cascade including the Avče pumping plant

V drugem koraku priredimo vsakemu vozlišču grafa spremenljivko volumna  $v$  in vsaki usmerjeni daljici grafa spremenljivko pretokov  $q$ . Spremenljivke pretokov  $q$  podajajo urna povprečja pretokov (od 0:00 do 1:00, od 1:00 do 2:00, ...), medtem ko podajajo spremenljivke volumnov  $v$  vrednosti vsebine regulacijskih bazenov ob točni uri (ob 0:00, 1:00, ...). Dobljene spremenljivke niso medsebojno neodvisne; v naslednjih poglavjih bo predstavljena množica enačb in neenačb, ki jih povezuje.

### 3.1 Začetne vrednosti

Robne pogoje za SHE podamo v začetnih stanjih regulacijskih bazenov  $v(0)$  in v vrednostih dotokov  $q$  v vseh časovnih intervalih. Na primeru s slike 1 moramo podati začetne vrednosti volumna  $v$  bazenih Podsela  $v_1(0)$ , Ajba  $v_2(0)$ , Solkan  $v_3(0)$  in Kanalški Vrh  $v_4(0)$ , in pa dotoke v bazen Podsela (ki so dotoki v celoten SHE) v vseh časovnih intervalih v spremenljivkah  $q_0(1), q_0(2), \dots, q_0(24)$ .

### 3.2 Naloga

Dopustno obratovanje SHE določimo tako, da določimo vrednosti vseh preostalih spremenljivk volumna  $v$  in pretokov  $q$ . Če opazujemo bazen Podsela na sliki 1, je tako treba določiti naslednjih 24 vrednosti:

$$v_1(1), v_1(2), \dots, v_1(24)$$

in podobno za HE Doblar 24 vrednosti pretokov:

$$q_1(1), q_1(2), \dots, q_1(24)$$

### 3.3 Osnovne omejitve

Spremenljivke volumnov  $v$  ne morejo zavzeti poljubnih vrednosti, saj ima regulacijski bazen samo končno velikost:

$$0 \leq v(t) \leq v_{kor} \quad ; \quad t = 1, 2, \dots, 24$$

kjer je  $v_{kor}$  uporabna prostornina regulacijskega bazena. Podobno morajo biti spremenljivke pretokov  $q$  vsake HE v vsakem stolpcu  $t$  omejene na interval med tehničnim minimumom  $q_{min}$  in inštaliranim pretokom  $q_{ins}$ :

$$q_{min} \leq q(t) \leq q_{ins} \quad ; \quad t = 1, 2, \dots, 24$$

V nekaterih primerih lahko spodnjo mejo  $q_{min}$  postavimo na nič, spet v drugih primerih pa je na tem mestu ustrezno uvesti  $\mathbb{Z}$ -spremenljivke, glej poglavje 3.7.

Spremenljivke pretokov  $q$  in spremenljivke volumnov  $v$  predstavimo s pozitivnimi števili:  $q \geq 0$  in  $v \geq 0$ . Izjema je le črpalni način obratovanja ČE, kjer uporabimo negativna števila:  $q < 0$ . Zato je na sliki 1 črpalni režim ČE Avče označen kot  $-q_4$ .

### 3.4 Bilanca regulacijskega bazena

To je osnovna enačba celotnega modela, ki medsebojno povezuje spremenljivke volumna  $v$  in spremenljivke pretokov  $q$ .

Dotok (turbinski pretok od zgoraj ležeče HE ali pa naravni dotok)  $q$  v regulacijski bazen v trenutni uri  $t$  poveča vrednost volumna regulacijskega bazena v naslednji uri  $t + 1$  za natanko  $(1 \text{ h} \times q)$  in odtok  $q$  iz tega bazena zmanjša opazovano vrednost volumna v naslednji uri za enako vrednost. Na primer, enačba regulacijskega bazena Podsela na sliki 1 v urah  $t = 0, 1, 2, \dots, 23$  ima naslednjo obliko:

$$v_1(t) + 3600 \times q_0(t + 1) - 3600 \times q_1(t + 1) = v_1(t + 1)$$

kjer merimo spremenljivke volumna  $v$  v  $\text{m}^3$  in spremenljivke pretokov  $q$  v  $\text{m}^3/\text{s}$ . V zgornji enačbi je mogoče upoštevati tudi morebitno nekajurno časovno zakasnitev med pretoki, če je razdalja med posameznimi HE in regulacijskimi bazeni velika.

### 3.5 Omejitev gradienta volumnov

Za nekatere regulacijske bazene je predpisana največja hitrost dviganja oziroma spuščanja gladine  $v_H$  (navadno izražena v  $\text{cm/h}$ ) zaradi varovanja brežin pred erozijo. Če predpostavimo linearno funkcijo volumna  $v$  območju uporabnih prostornin, potem lahko ta pogoj predstavimo kot linearno omejitev gradienta funkcij volumna med sosednjima urama:

$$|v(t + 1) - v(t)| \leq v_{kor} \times \frac{v_H}{DH} \quad ; \quad t = 0, 1, \dots, 23$$

kjer je  $DH$  razlika nadmorskih višin polnega ( $v = v_{kor}$ ) in praznega ( $v = 0$ ) bazena.

### 3.6 Cikel regulacijskega bazena

Pri obdelavah z modelom Flores je smiselno, a ne obvezno, vključiti tudi enačbo volumskega cikla. Če obravnavamo dnevni cikel, ima ta enačba naslednjo preprosto obliko:

$$v(0) = v(24) \quad (1)$$

Končno vrednost volumna  $v(24)$  lahko postavimo tudi na kakšno drugo želeno vrednost. Če je regulacijski bazen zelo velik, je to vrednost smiselno poiskati s pomočjo specializiranih modelov, ki upoštevajo sezonsko porazdelitev padavin v vsem letu. Če pa končne vrednosti volumna  $v(24)$  ne postavimo, navadno določi model Flores - zaradi maksimiranja dobička - popolno izpraznjenje bazenov na koncu trenutnega dne, kar pa potem pomeni ustrezno manjši dobiček v naslednjih dneh.

Začetno vrednost  $v(0)$  navadno postavimo v skladu s poglavjem 3.1. Če se držimo enačbe (1), nam ni treba specificirati ne začetne ne končne vrednosti, marveč prepustimo modelu Flores določitev najbolj optimalnih vrednosti.

### 3.7 Spremenljivke z disjunktним definicijskim območjem

Nekaterim HE lahko v določenih urah vsilimo minimalne pretoke  $q_{min} > 0$  zaradi neenergetskih potreb kot so uporaba vode za urbana naselja, namakanje, meddržavni dogovori itd.

Če uporabljamo samo navadni LP (in nobenih  $\mathbb{Z}$ -spremenljivk), potem ni primerno postaviti omejitev minimalnih pretokov celotne HE na vrednost minimalnih pretokov njene najmanjše turbine, saj potem dobimo neželjeno obvezno obratovanje celotne HE v vsaki uri. Rešitev je uvedba binarnih  $\mathbb{Z}$ -spremenljivk  $qb$  v vsaki uri  $t = 1, 2, \dots, 24$ :

$$q_{min} \times qb(t) \leq q(t) \leq q_{ins} \times qb(t) \quad (2)$$

Če je binarna spremenljivka  $qb$  enaka nič, je enak nič tudi ustrezeni turbinski pretok  $q$ . Če pa je binarna spremenljivka  $qb$  enaka 1, potem je turbinski pretok v intervalu med  $q_{min}$  in  $q_{ins}$ . Definijsko območje spremenljivke pretokov  $q$  je tako disjunktna unija dveh množic: točke nič in intervala med  $q_{min}$  in  $q_{ins}$ :

$$\{0\} \cup \{[q_{min}, q_{ins}]\}$$

V določeni uri taka HE ali sploh ne obratuje ali pa obratuje v natančno predpisanem delovnem območju.

Uvedba binarnih spremenljivk znatno poveča čas reševanja. Če to postane problem, uporabimo binarne spremenljivke samo pri tistih HE, kjer je to povsem nujno, na primer pri elektrarnah z razmeroma visokimi tehničnimi minimumi, pri preostalih elektrarnah pa uporabimo samo navadne  $\mathbb{R}$  spremenljivke in pa pogoj  $q_{min} = 0$ .

### 3.8 Enačba reverzibilne turbine

Oba režima obratovanja ČE lahko izvede ena sama reverzibilna turbina v dveh režimih obratovanja: turbinskem in črpalnem. Na sliki 1 sta bila ta režima predstavljena kot pretoka  $q_5$  in  $-q_4$  pri ČE Avče. V uri  $t$  ČE ne more obratovati v obeh načinih hkrati, zato  $t$ -komponenti obeh vektorjev ne moreta biti hkrati obe različni od nič. Ta problem je, kot v prejšnjem poglavju, mogoče učinkovito rešiti z uvedbo binarnih vektorjev  $qb_4$  in  $qb_5$ , ki ju generiramo z vključitvijo ustreznih enačb tipa (2). Z binarnima vektorjema  $qb$  potem izrazimo pogoj reverzibilne turbine zelo preprosto kot linearno neenačbo:

$$qb_4(t) + qb_5(t) \leq 1 \quad ; \quad t = 1, 2, \dots, 24$$

ki zahteva, da v vsaki uri  $t$  ČE Avče ali sploh ne obratuje ( $qb_4(t) = qb_5(t) = 0$ ) ali pa obratuje natanko na en način: turbinski ( $qb_4(t) = 0$  in  $qb_5(t) = 1$ ) ali črpalni ( $qb_4(t) = 1$  in  $qb_5(t) = 0$ ).

### 3.9 Spremenljivke moči

Razen spremenljivk volumna  $v$  in pretokov  $q$  uvedemo v modelu Flores tudi spremenljivke moči  $p$ , ki jih določijo iz energetskih karakteristik odvisnosti med pretoki  $q$  in izhodno močjo  $p$ . V sedanji verziji modela Flores aproksimiramo energetske karakteristike na linearni način:

$$p(t) = A \times q(t) + B \quad ; \quad t = 1, 2, \dots, 24$$

z nekima konstantama  $A > 0$  in  $B$ , ki sta specifični za vsako HE.

### 3.10 Skupna električna energija

Skupno električno energijo SHE v uri  $t = 1, 2, \dots, 24$  dobimo tako, da seštejemo proizvodnje posameznih HE in od tega odštejemo porabo posameznih ČE. Na sliki 1 to pomeni:

$$pc(t) = [p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) + p_5(t)] - [-p_4(t)]$$

kjer so spremenljivke  $p_1, p_2, p_3, p_5$  pozitivne ali enake nič, medtem ko je spremenljivka  $p_4$  negativna ali kvečjemu enaka nič. Vsaj ena od spremenljivk  $p_4$  in  $p_5$  je v vsaki uri enaka nič.

### 3.11 Dobiček

Skupaj proizvedeno električno energijo  $pc$  ponujamo na trgu. Model Flores predvideva, da je napoved cene električne energije na trgu  $c$  znana vnaprej iz ustreznih specializiranih modelov [8]. Pričakovani dnevni dobiček  $\Pi$  znaša

$$\Pi(q, v) = \sum_{t=1}^{24} c(t) \times pc(t) \quad (3)$$

in naloga modela Flores je določiti spremenljivke pretokov  $q$  in spremenljivke volumnov  $v$  v vsaki uri  $t$ , ki po eni strani zadoščajo vsem enačbam in neenačbam prejšnjih poglavij (in zato pomenijo tehnično dopustno rešitev), po drugi strani pa prinesejo največji dobiček:

**maksimiraj**  $\Pi(q, v)$   
**pri pogojih** poglavja 3.1, 3.3 – 3.10

Energijo za črpanje bi lahko v modelu Flores kupovali na enem trgu z marginalno ceno  $c_1$ , medtem ko bi proizvedeno električno energijo prodajali na drugi trg z marginalno ceno  $c_2$ . SHE, ki vsebuje ČE, bi v tem primeru transformiral poceni električno energijo na enem trgu v drago vršno električno energijo na drugem. Taka študija pa bi, seveda, morala upoštevati tudi veliko več operativnih dejavnikov: zakup prenosnih poti, izgube in cene prenosa itd.

## 4 Dva primera

Za ilustracijo modela Flores na kratko podajamo dva primera rezultatov, prvi po [14], drugi pa po [15].

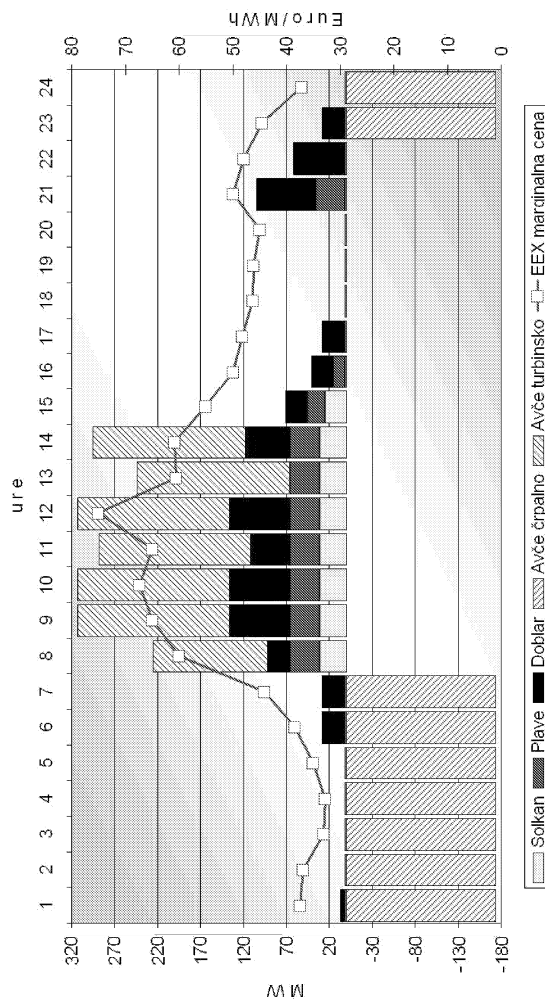
### 4.1 Obstoječe HE na Soči + ČE Avče

Slika 1 podaja graf pretokov SHE na Soči\*. Tehnične karakteristike smo povzeli po [11] in [12], napoved cene električne energije pa po trgu EEX [19]. Slika 2 prikazuje preostale podatke in rezultate modela Flores. Stroškov transporta nismo upoštevali, neto dobiček je bil 90612 €.

### 4.2 Tedenski cikel rehabilitirane HE Moste

Rehabilitirana HE Moste obsega akumulacijsko enoto Moste II in kompenzacijsko enoto Moste III, pomanjšani graf na sliki 3. Tehnične podatke smo povzeli po [13]. Slika 3 prikazuje tedenski cikel obratovanja enote Moste II in funkcijo volumna akumulacijskega bazena za primer razmeroma velikih dotokov: 35 m<sup>3</sup>/s. Način obratovanja je bil povzet

\*Uporabljeni poenostavljeni model ni upošteval, da je za črpalni režim ČE Avče dosegljiva le prostornina od 540000 do 960000 m<sup>3</sup> regulacijskega bazena Ajba.



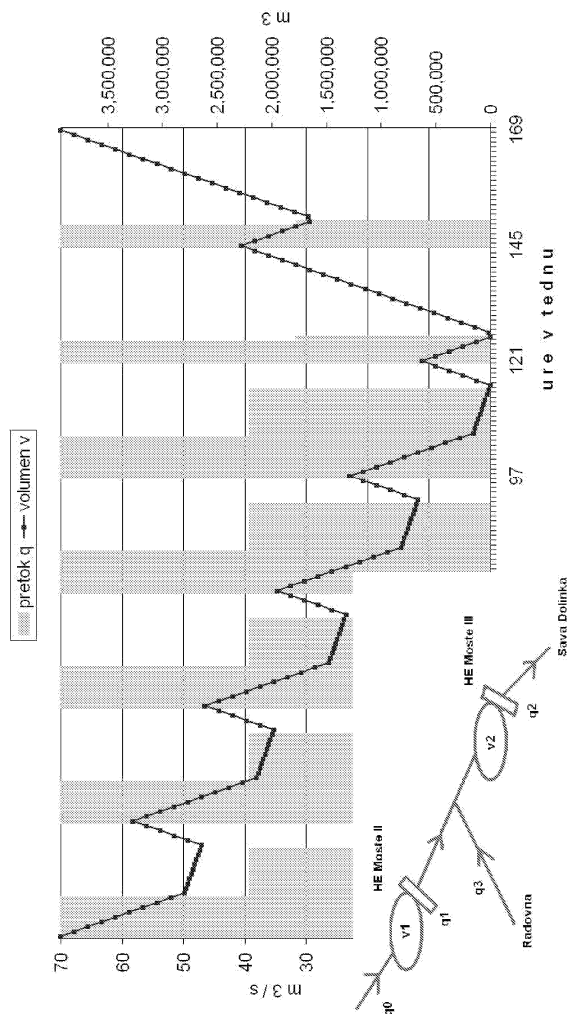
Slika 2. Optimalno obratovanje verige HE na Soči vključujoč ČE Avče glede na trg EEX dne 15. aprila 2005 in glede na dotoke 66.8 m<sup>3</sup>/s. Vir: model Flores.

Figure 2. Soča river plants including Avče pumping plant operation, EEX Leipzig prices, April 15, 2005, inflow 66.8 m<sup>3</sup>/s. Source: the Flores model.

po teoriji konstantne in variabilne energije iz [16]. Po tem postopku dobimo uporabne funkcijske zveze med primarnimi parametri projekta: inštaliranim pretokom, velikostjo regulacijskega bazena itd. pri eni HE, z modelom Flores pa jih učinkovito verigo HE. V primeru na sliki 3 kompenzacijski bazen HE Moste III ne more ob zahtevani *popolni* izravnavi pretokov povsem izravnati pretokov, zato mora ob delavnikih obratovati nekaj ur na pretočni način.

## 5 Sklep

Novo deregulirano okolje zahteva, da proizvodna podjetja trgov z električno energijo podajo ponudbe, na katerih morajo vnaprej specificirati velikost in ceno. Način obratovanja SHE je v večji meri



Slika 3. Tedenski cikel obratovanja HE Moste II na način po prof. Požarju [16], dotok  $35 \text{ m}^3/\text{s}$ . Vir: model Flores. Figure 3. Moste II weekly-cycle operation pattern at  $35 \text{ m}^3/\text{s}$  according to [16]. Source: the Flores model.

odvisen od napovedi dotokov vode, stanje regulacijskih bazenov, tehničnih karakteristik posameznih HE v verigi in njihovih hidroloških povezav. Če je hkrati znana tudi napoved cene za naslednji dan, potem lahko nastali optimizacijski problem učinkovito rešimo z metodo MILP. Članek predstavlja novi MILP model Flores, razvit na Elektrotehničnem inštitutu Milan Vidmar.

## 6 Literatura

- [1] A. J. Conejo, J. M. Arroyo, J. Contreras, F. A. Villamor, Self-scheduling of a hydro producer in a pool-based electricity market, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, no. 4, pp. 1265 - 1272, November 2002.
- [2] J. M. Arroyo, A. J. Conejo, Optimal response of a thermal unit to an electricity spot market, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, pp. 1098 - 1104, August 2000.
- [3] J. F. Restrepo, F. D. Galiana, Unit commitment with primary frequency regulation constraints, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 4, pp. 1836 - 1842, November 2005.
- [4] T. Li, M. Shahidehpour, A Case of Lagrangian relaxation versus mixed integer programming, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 4, pp. 2015 - 2015, November 2005.
- [5] H. Habibollahzadeh, J. A. Bubenko, Applications of decomposition techniques to short-term operation planning of hydro thermal power systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. PWR-1, pp. 41 - 47, February 1986.
- [6] O. Nilsson, D. Sjelvgren, Variable splitting applied to modeling of start-up costs in short-term hydro generation scheduling, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, pp. 770 - 775, May 1997.
- [7] X. Guan, S. Guo, Q. Zhai, The conditions for obtaining feasible solutions to security-constrained unit commitment problems, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 4, pp. 1746 - 1756, November 2005.
- [8] F. J. Nogales, J. Contreras, A. J. Conejo, R. Espinola, Forecasting Next-Day Electricity Prices by Time Series Models, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, pp. 342 - 348, May 2002.
- [9] B. Kremer, D. Dolinar, Optimizacija proizvodnje električne energije na dereguliranem trgu, *Elektrotehniški vestnik, Ljubljana*, let. 72, št. 2, str. 97 - 106, 2005
- [10] M. Polh, D. Paravan, R. Golob, Nashevo ravnotežje na trgu električne energije, *Elektrotehniški vestnik, Ljubljana*, let. 71, št. 3, str. 134 - 139, 2004
- [11] R. Maksič, Z. Bregar et al., *Hidroelektrarne na Soči*, EIMV ref. št. 1194, 1994
- [12] SENG, ČRPALNA HIDROELEKTRARNA AVČE (ČHE AVČE), Nova Gorica. Dostopno na: [www.seng.si](http://www.seng.si).
- [13] G. Zlatarev, Z. Bregar et al., *Vloga HE Moste na trgu električne energije*, EIMV ref. št. 1679, 2004
- [14] Z. Bregar, Short-term optimization of the new Avce pumping plant and three existing hydro power plants on the Soca river in Slovenia, *Electr. Power Syst. Res.* (2006), doi:10.1016/j.epr.2006.10.011
- [15] Z. Bregar, Three utilization patterns of the renovated Moste hydro power plant on an electricity market of power and ancillary services, *Electr. Power Syst. Res.* 77 (2007) 252-258
- [16] H. Požar, *Snaga i energija u elektroenergetskim sistemima*, Informator Zagreb, 1983
- [17] Z. Bregar, Model PRAK za izračun mogoče proizvodnje verige pretočnih akumulacij, *Elektrotehniški vestnik, Ljubljana*, let. 72, št. 5, str. 243 - 248, 2005
- [18] M. Strubegger, Z. Bregar et al., *MESSAGE-IV user manual*, IAEA, EIMV ref. št. 1532, 2001
- [19] EEX, European Energy Exchange, Leipzig. Dostopno na: [www.eex.de](http://www.eex.de).
- [20] A. Makhorin, *GNU linear programming kit, GLPK, User's Manual*, Free Software Foundation, 2004

**Zvonko Bregar** je diplomiral leta 1988 in magistriral leta 2000 na Univerzi v Ljubljani. Od diplome je zaposlen na EIMV, kjer dela na področju dolgoročnega načrtovanja proizvodnega sektorja elektroenergetskega sistema. Specializiral se je za teorijo in računalniške programe domačih modelov in modelov Mednarodne agencije za jedrsko energijo na Dunaju (IAEA).