

Regulacija toka elektrolize z mehkim regulatorjem

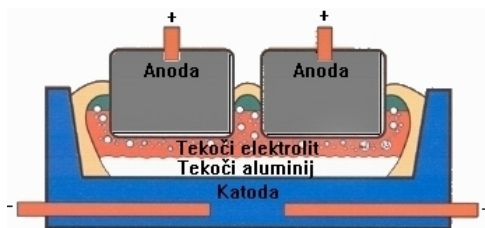
mag. Anton VERDENIK univ.dipl.inž.
TALUM d.d.
Tovarniška c.10 2325 Kidričevo, SI-Slovenija
toni.verdenik@talum.si

Control of electrolysis current with fuzzy logic

Abstract: DC current provided energy for running electrolysis process in primary aluminium smelter. This paper describes a successfully upgrade of 75kA substation closed loop control with fuzzy logic.

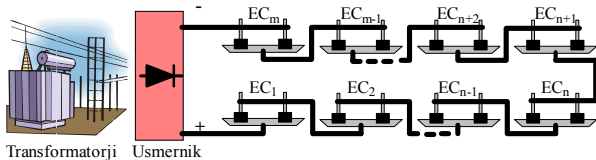
1 Uvod

Primarni aluminij pridobivamo po Hall-Heroult-ovem postopku z elektrolizo glinice (Al_2O_3) v elektrolizni celici (EC), katere prerez je na sliki 1.



Slika 1: Elektrolizna celica

Zadostna produktivnost je dosežena z instalacijo več 100 EC v elektrolizno dvorano, ki je prikazana na sliki 2. Osnovni pogoj za stabilni potek procesa je napajanje elektrolize s konstantnim enosmernim električnim tokom, ki predstavlja energijo za potek procesa in ga zagotavlja napajalno usmeriški sistem [1].



Slika 2: Elektrolizna dvorana

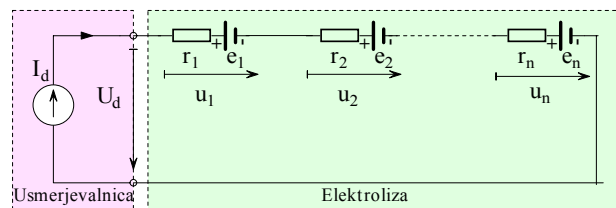
Elektroliza B v TALUMU Kidričevo z 184 EC jakosti toka 75kA je bila instalirana leta 1963. Sistem za regulacijo enosmernega toka ni bil več skladen z modernimi zahtevami po

natančnosti, robustnosti, fleksibilnosti in ergonomiji vodenja. Ob upoštevanju stanja in zmogljivosti naprav, stroškov izvedbe ter tehnologije procesa so bili postavljeni cilji za izboljšavo sistema regulacije toka elektrolize:

- večja natančnost regulacije, vsaj $\pm 0.2kA$,
- bolj robustna regulacija,
- avtomatsko, lokalno in ročno vodenje ter
- primerna ergonomija vodenja

2 Opis procesa in opredelitev problema

V elektrolizi so celice vezane zaporedno. Posamezno EC predstavimo kot vezavo upornosti r_i , ter galvanskega člana e_i (slika 3).



Slika 3: Model elektrolize

Napetost na sponkah elektrolize U_d je vsota padcev napetosti na posamezni EC (1).

$$U_d = \sum_{i=1}^n u_i \quad (1)$$

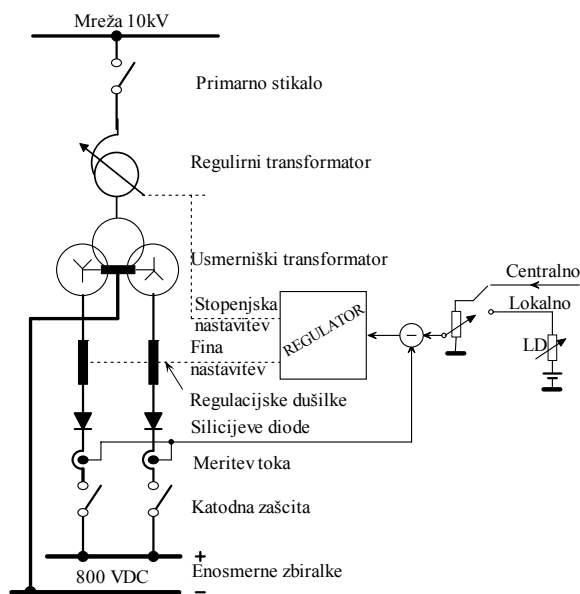
Padec napetosti posamezne EC je vsota polarizacijske napetosti, ki je potrebna za razkroj molekule Al_2O_3 , reverzibilnih napetosti, ki so posledica kemičnih reakcij ter padcev napetosti zaradi upornosti segmentov EC skozi katere teče električni tok (2).

$$U_i = E_{rev} + \sum \eta_{rev} + \sum r \cdot I_d \quad (2)$$

Model procesa je kompleksen, ker so člani enačbe (2) funkcije odvisne od številnih

tehnoloških parametrov. Proces elektrolize v obratu ni računalniško voden. Zato prihaja do relativno velikih nihanj upornosti, zlasti ob anodnih efektih ter ob motnjah, ki jih povzročajo delovne operacije kot so črpanje metala, menjava anodnih blokov in doziranje glinice. Elektroliza je izrazito nelinearno, dinamično električno breme, ki se spreminja v zelo širokem razponu.

Usmerjevalnico elektrolize B sestavlja 10 usmerniških skupin (US) jakosti toka 10kA s primarno napetostjo 10kV in 2 US jakosti 30kA s primarno napetostjo 110kV. Na sliki 4 je prikazana shema US. Regulacija toka je izvedena stopenjsko s preklopi stopenj na regulirnem transformatorju ter zvezno s spreminjanjem predmagnetizacije regulacijskim dušilkam.



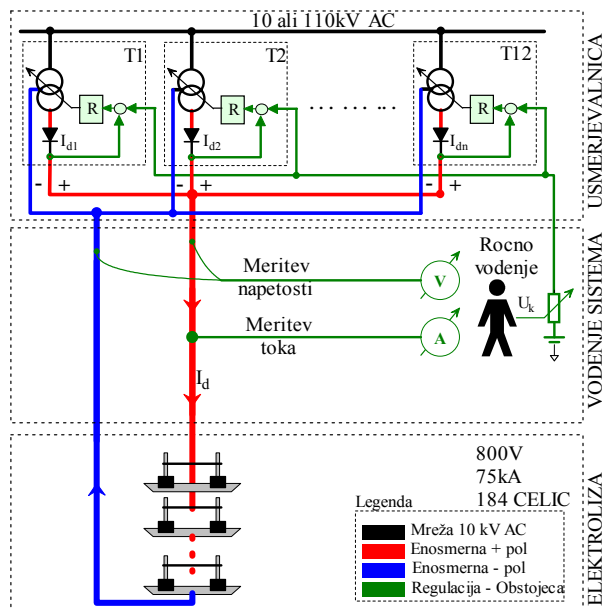
Slika 4: Usmerniška skupina

V sistemu napajanja delujejo US vzporedno. Tokovne regulacije posameznih US so povezane na skupno referenčno vrednost, ki omogoča le ročno korekcijo toka (slika 5). Ker sistem ni reguliran po skupnem toku I_d ampak po parcialnih tokovih I_{di} posameznih US, pride do statičnega regulacijskega pogreška zaradi:

- večjih sprememb upornosti elektrolize,
- sprememb toka posameznih US,
- stikalnih manipulacij na US in

- nihanju napetosti na primarni strani.

Regulacijski pogrešek, ki ga regulacija ne odpravi, mora kompenzirati operater z ročno korekcijo napetosti U_k . Rezultati takšne regulacije niso bili optimalni.

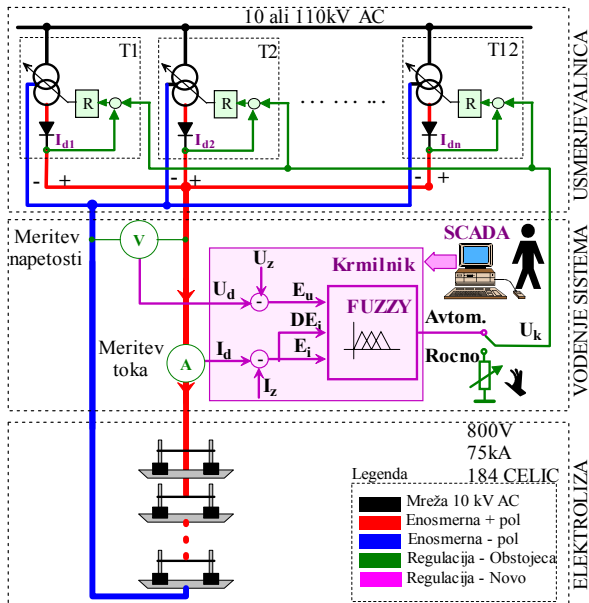


Slika 5: Obstoječ sistem napajanja elektrolize

3 Struktura sistema vodenja

3.1 Koncept nadgradnje regulacije toka

V novem konceptu vodenja je regulacija toka nadgrajena z dodatno regulacijsko zanko, ki je prikazana na sliki 6. V tako izvedeni kaskadni regulaciji so regulatorji tokov US nespremenjeni in imajo vlogo pomožnih regulatorjev. Glavni regulator meri skupni tok (I_d) in napetost (U_d) elektrolize, ter spreminja izhod U_k , ki je referenčna vrednost pomožnim regulatorjem. Glede na nelinearno in multivariabilno naravo procesa, ter dejstvo da je postopek korekcije U_k *iskustven* je za glavni regulator izbran mehki regulator. Sestavni del sistema je tudi SCADA za analizo delovanja, nastavitve zelenega toka I_z , ter ostalih parametrov.

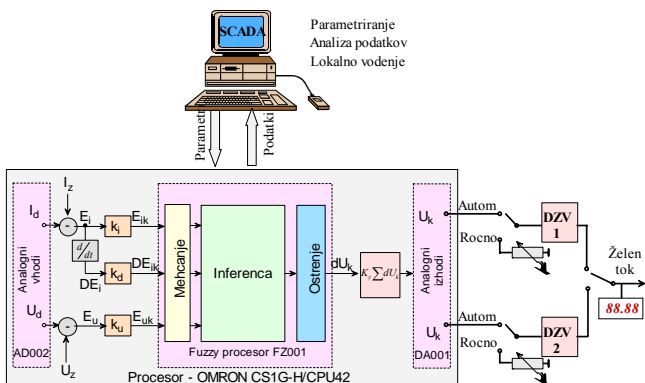


Slika 6: Koncept nadgradnje regulacije toka

3.2 Načrtovanje mehkega regulatorja

Struktura sistema

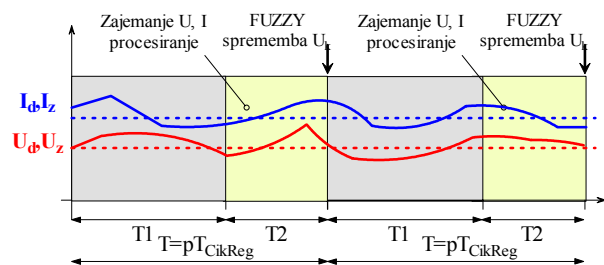
Na sliki 7 je prikazana struktura sistema za vodenje z mehkim regulatorjem. Jedro tvori krmilnik Omron CS1, ki meri tok in napetost elektrolize ter izračunava vhodne spremenljivke mehkega regulatorja E_i , DE_i in E_u . Izhod regulatorja je napetost U_k , ki je preko ustreznega pretvornika priključena na referenčne vhode regulatorjev posameznih US. Zaradi večje obratovalne varnosti je izhodni tokokrog redundanten z možnostjo ročnega vodenja.



Slika 7: FUZZY regulator v krmilniku OMRON

Dinamika regulacije

Dinamika spreminjanja izhodne veličine je ključna za stabilno delovanje regulacijske proge. Elektroliza je dinamičen sistem, regulacijski elementi usmerniških naprav pa imajo številne mrtve čase. Uspešno je bil uporabljen princip spreminjanja regulirne veličine v časovnih intervalih imenovanih regulacijski cikel dolžine pT_{CikReg} . Sestavljen je iz regulacijske (T_1) in merilne (T_2) polperiode. V merilni polperiodi poteka vzorčenje vhodnih spremenljivk, na začetku regulacijske polperiode pa se spremeni regulirna veličina (slika 8).



Slika 8: Princip spreminjanja izhodne veličine

Mehčanje vhodno izhodnih spremenljivk

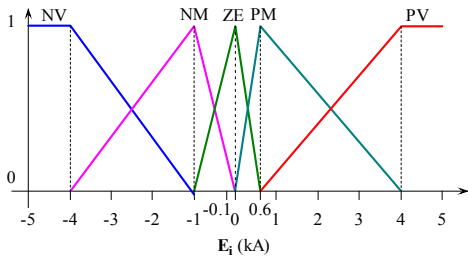
Pripadnostne funkcije vhodno izhodnih spremenljivk so opisane z naslednjimi stopnjami:

- NV: Negativen velik
- NS: Negativen srednji
- NM: Negativen mali
- ZE: Nič
- PM: Pozitiven mali
- PS: Pozitiven srednji
- PV: Pozitiven velik

Regulacijsko odstopanje toka izračunamo po enačbi (3).

$$E_{ik} = [I_z - I_d] \cdot K_i \quad (3)$$

Na sliki 9 so prikazane pripadnostne funkcije E_i , z petimi stopnjami. Optimalna občutljivost je dosežena z gostejšo porazdelitvijo v delovni točki. Izkazalo se, da je boljša natančnost dosežena z asimetrično postavitvijo funkcije ZE.

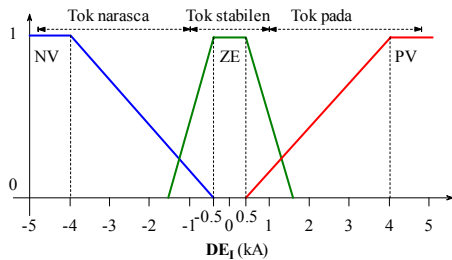


Slika 9: Pripadnostne funkcije E_i

Gradient regulacijskega odstopanja predstavlja spremembo toka med dvema regulacijskima cikloma (4).

$$DE_{ik} = [E_i(T) - E_i(T-1)] \cdot K_d \quad (4)$$

Pripadnostne funkcije DE_i imajo tri stopnje in so prikazane na sliki 10.



Slika 10: Pripadnostne funkcije DE_i

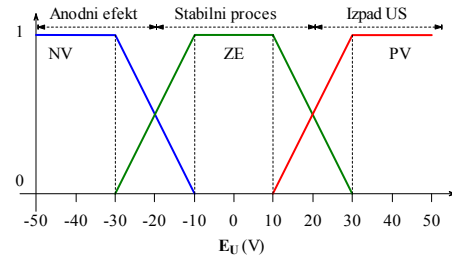
Spremembe upornosti E_C so specifične za določene faze tehnološkega procesa. Optimalni odzivi so doseženi, če regulator identificira vrsto motnje in formira specifičen odziv. Napetost elektrolize pa je tista spremenljivka, ki omogoča identifikacijo vrste motnje v procesu tako, da krmilnik izračunava referenčno napetost U_z pri kateri poteka proces stabilno (ni anodnih efektov ali stikalnih manipulacij) ter s pomočjo razlike med referenčno in trenutno napetostjo ugotovi tip motnje (5).

$$E_{uk} = [U_z - U_d] \cdot K_u \quad (5)$$

Referenčna napetost U_z je definirana kot povprečna napetost elektrolize, pri regulacijskem odstopanju toka manj kot pE_{imin} neprekinjeno $pNEI$ ciklov (6).

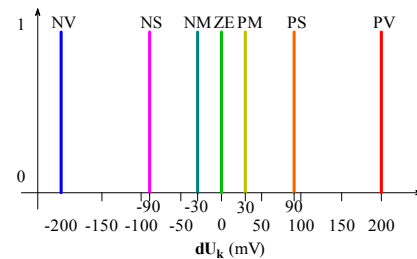
$$((I_z - I_d) \leq pE_{iMin}) \text{traja } pNEI \Rightarrow U_z = \bar{U}_E \quad (6)$$

Pripadnostne funkcije E_{uk} imajo tri stopnje in so prikazane na sliki 11.



Slika 11: Pripadnostne funkcije E_u

Pripadnostne funkcije spremembe izhodne veličine dU_k , imajo 7 stopenj in so prikazane na sliki 12.



Slika 12: Mehčanje izhodne spremenljivke dU_k

Pravila krmiljenja

Pravila krmiljenja, ki so sestavljena na osnovi poznavanja procesa in izkušenj ob ročnem vodenju so prikazana v tabeli 1.

$E_u = ZE$ (normalna napetost)						
E_i						
DE_i		NV	NM	ZE	PM	PV
	PO	NS	NM	ZE	ZE	PM
	ZE	NV	NM	ZE	PM	PV
	NE	NM	ZE	ZE	PM	PS
$E_u = PO$ (nizka napetost)						
E_i						
DE_i		NV	NM	ZE	PM	PV
	PO	NM	NM	ZE	PM	PS
	ZE	NM	NM	ZE	PM	PV
	NE	NM	ZE	ZE	PS	PV
$E_u = NE$ (visoka napetost)						
E_i						
DE_i		NV	NM	ZE	PM	PV
	PO	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
	ZE	NM	NM	ZE	PM	PM
	NE	NM	ZE	ZE	ZE	ZE

Tabela 1: Pravila krmiljenja

Iz tabele kreiramo 45 pravil v naslednji obliki:

IF(E_i is NV) **AND** (DE_i is ZE) **AND** (E_u is ZE) **THEN** (dU_k is NV)

Ostrenje izhodne spremenljivke

Ostra vrednost izhodne spremenljivke se določi po težiščni metodi (COG). Mehki regulator ob koncu vsakega regulacijskega cikla T določi potrebno spremembo izhodne napetosti dU_k . Regulirno veličino U_k pa izračuna krmilnik z integracijo (7):

$$U_k = U_k(T-1) + K_y \cdot dU_k \quad (7)$$

4 Rezultati in diskusija

Prikazano je delovanje sistema v realnih razmerah s parametri, ki so navedeni v tabeli 2.

Parameter	Vrednost
pT_{CikReg}	20 s
T_2	10 s
pE_{imin}	$\pm 0.3 \text{ kA}$
$pNEI$	4
K_b, K_d, K_w, K_v	1

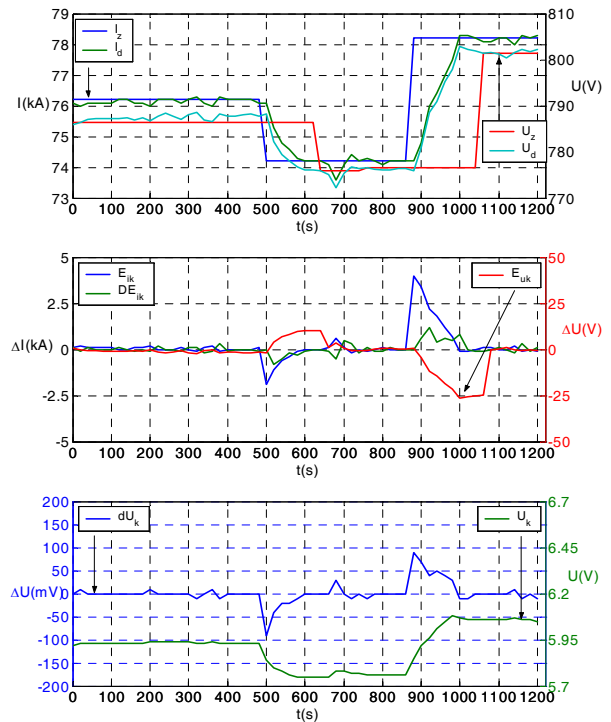
Tabela 2: Delovni parametri

4.1 Sledenje spremembam zelene vrednosti

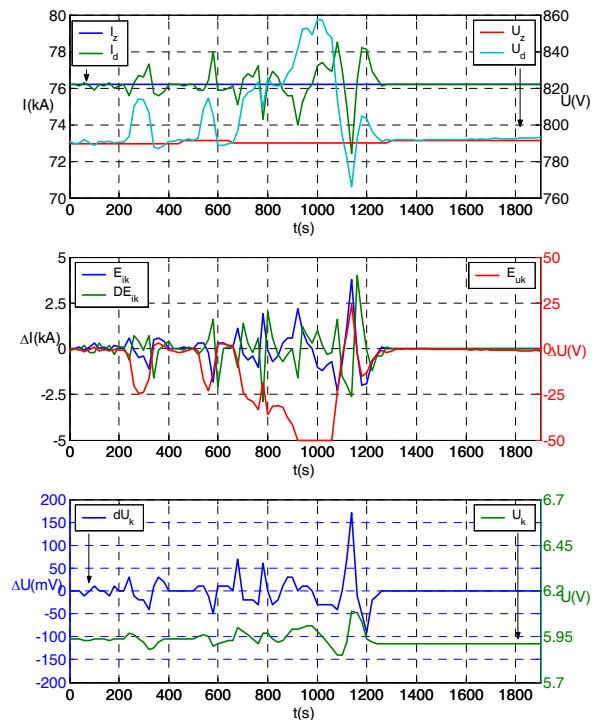
Na sliki 13 je prikazano sledenje (tracking) spremembam zelenega toka I_z . Sistem voden z mehkim regulatorjem dobro sledi spremembam. Ko se tok elektrolize stabilizira, sistem določi novo referenčno napetost U_z po kriteriju (5).

4.2 Odzivi na motnje

Anodni efekt (AE) je karakteristični tehnološki pojav, do katerega pride zaradi pomankanja glinice v elektrolitu. Ob AE se velikokrat tako poveča upornost EC, da je napajalni sistem popolnoma izkrmiljen. Tok elektrolize se zmanjša, napetost pa se poveča. To stanje identificira $DEU < 0$. Ker napajalni sistem zaradi velike upornosti bremena ne more več zagotavljati zelenega toka, mora biti mehki regulator kljub regulacijskemu odstopanju toka E_i pasiven (slika 14). V nasprotnem primeru bi po prenehanju AE tok preveč zanihal. V obravnavanem primeru so AE pogosti, ker doziranje glinice v EC ni avtomatsko.



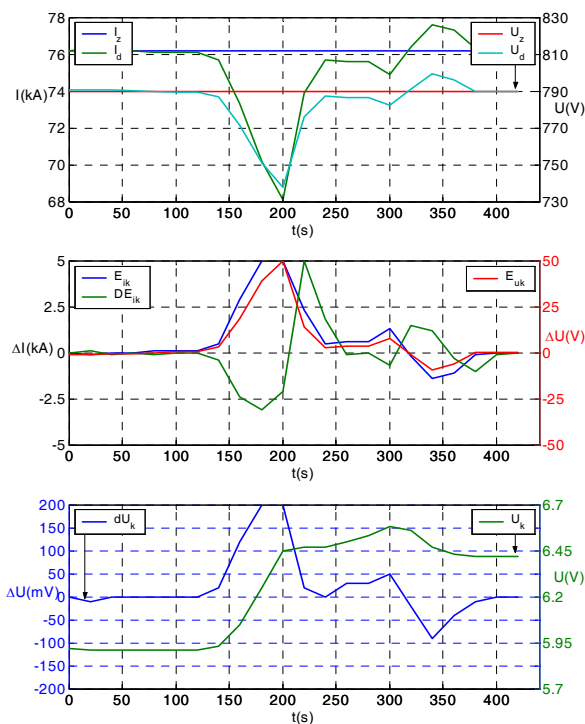
Slika 13: Sledenje zeleni vrednosti



Slika 14: Motnja - Anodni efekti

V primeru izklopa ali izpada usmerniške skupine se tok in posledično napetost elektrolize zmanjšata. Za to stanje je značilno, da je $DEU > 0$. V tem primeru mehki regulator aktivno

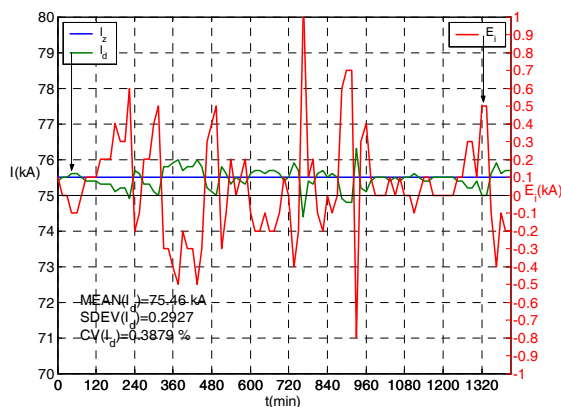
sledi spremembi in ustrezno dvigne izhodno napetost U_k , kar je prikazano na sliki 15.



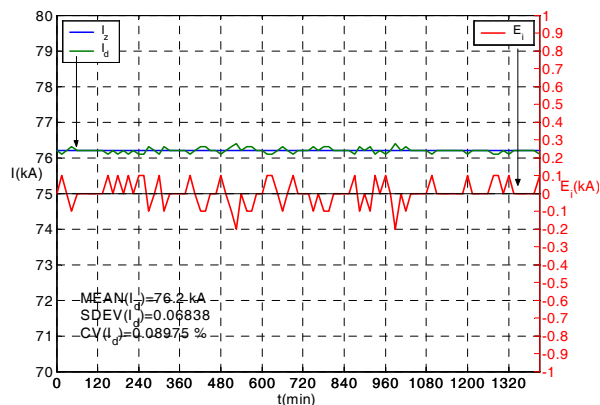
Slika 15: Motnja - Izklop usmerniške skupine

4.3 Kvaliteta regulacije

Za kvalitativno oceno regulacije je izbrana meritev povprečnega 15 minutnega regulacijskega odstopanja toka. Narejena je primerjava enozančne regulacije z ročno korekcijo zelene vrednosti (slika 16) in kaskadne regulacije z FUZZY regulatorjem (slika 17). Rezultati kažejo, da je sistem z FUZZY regulatorjem bistveno bolj natančen. Nihanje toka se zmanjša do 4 krat, kar je zelo ugodno za teološki proces.



Slika 16: Dnevna bilanca – ročno vodenje



Slika 17: Dnevna bilanca – FUZZY regulator

5 Zaključek

Predstavljena je bila uspešna nadgradnja regulacije toka napajalno usmerniškega sistema elektrolize primarnega aluminija z mehkim regulatorjem. Relativno enostaven poseg v strukturo sistema je imel številne pozitivne učinke:

- večja natančnost regulacije,
- sistem je bolj robusten,
- dosežena je dobra fleksibilnost sistema,
- moderna ergonomija vodenja sistema,
- povečana obratovalna varnost in
- izboljšali so se tehnološki parametri procesa elektrolize.

Integracija mehkega regulatorja v sistem vodenja je sorazmerno enostavna, vendar je potrebno imeti kvalitetno znanje o procesu.

Opisana aplikacija lahko služi kot model za učinkovito modernizacijo številnih zastarelih procesnih sistemov z relativno nizkimi investicijskimi stroški.

6 Literatura

- [1] Grjotheim, Welch: *Aluminium Smelter Technologies*, Aluminium Verlag, Dusseldorf, Germany 1982
- [2] Dali Đonlagić: *Osnove snovanja mehkih (Fuzzy) regulacij*, Tehniška fakulteta Maribor, 1994
- [3] Golob, Muškinja: *Osnove snovanja mehkih (Fuzzy) regulacij VAJE*, Tehniška fakulteta Maribor, 1994