

Drago Ban,
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet Elektrotehnike i računarstva
drago.ban@fer.hr

Milivoj Puzak
Tehničko veleučilište u Zagrebu
mpuzak@tvz.hr

Davor Grubišić, Mario Iličić, Davor Škarić,
HEP Proizvodnja, TE-TO Osijek
davor.grubisic@hep.hr, mario.ilicic@hep.hr, davor.skaric@hep.hr

MOGUĆNOSTI POBOLJŠANJA TEHNOLOŠKOG PROCESA I UŠTEDA ENERGIJE PRIMJENOM FREKVENCIJSKI REGULIRANOG POGONA, ISKUSTVA IZ TE-TO OSIJEK

SAŽETAK

U referatu su ukratko opisani tehnološki problemi vođenja pogona 3 cirkulacijske vrelovodne pumpe sustava centralnog grijanja u TE-TO Osijek te razlozi za ugradnju frekvencijski reguliranog elektromotornog pogona jedne pumpe. Navedeni su osnovni tehnički podaci instaliranih visokonaponskih kaveznihi motora i pumpi, ugrađenog frekvencijskog pretvarača i prikazane osnovne strukturne sheme pumpnog postrojenja.

Na temelju prikupljenih podataka iz pogona, za period od puštanja u pogon reguliranog pogona do pisanja ovog rada, obrađeni su pokazatelji o postignutim uštedama energije, smanjenju emisije CO₂ te poboljšanju tehnološkog procesa vrelovodnog sustava. Pojednostavljenim ekonomskim izračunima se došlo do zaključka da se s naslova ušteda energije investicija u navedeni projekt isplati u roku od 2,5 do 3 godine i da se smanjuje emisija CO₂ oko 800-1200 tona godišnje. Ostvarena poboljšanja tehnološkog procesa i smanjena elektromehanička naprezanja opreme nisu posebno valorizirana. Istaknuta je isplativost i opravdanost uvođenja reguliranihi elektromotornih pogona u termoelektrane-toplane i naglašeno da je opisani projekt prvi na razini srednjeg napona u HEP-u.

Ključne riječi: uštede energije, regulirani elektromotorni pogon, ugljikov dioksid,

POSSIBILITIES TO IMPROVE THE TECHNOLOGICAL PROCESS AND ENERGY SAVINGS BY USING A FREQUENCY CONVERTER CONTROL- EXPERIENCES FROM TE-TO OSIJEK

SUMMARY

The paper briefly describes the technological problems of managing 3 hot water circulation pumps for central heating system in TE-TO Osijek, and the reasons for the installation of frequency controlled electric drive of one pump. Specifications of installed high-voltage induction motors and pumps, integrated frequency converter and the basic structural scheme of the pumping plant are presented.

Based on the data collected from the power plant, the achieved energy savings, the reduction of carbon dioxide (CO₂) emissions and improvement of the technological process of hot water heating system have been processed for a period between commissioning the variable speed control system and writing of this paper. Simplified calculations of energy savings show that the capital investment in the project pays off within 2.5 to 3 years. The reduction of carbon dioxide emissions is approximately 800-1200 tones per season of central heating. The improvement of technological process and reduction of electromechanical stress on equipment are have not been evaluated. The effectiveness and necessity of introduction of variable speed electric drives in thermal power plants have been emphasized and it has been pointed out that described project is the first of its kind implemented on medium voltage level in the Croatian Power Utility.

Key words: Energy savings, variable speed electrical drives, carbon dioxide emissions

1. UVOD

Zamijeniti neregulirane elektromotorne pogone koji se već nalaze u upotrebi reguliranim dobro je poznata praksa u mnogim tehnički razvijenim zemljama, a temeljni je razlog mogućnost ušteda električne energije, smanjenje emisije CO₂ i poboljšanje tehnološkog procesa. Nove se pogone projektira kao regulirane gdje god je to tehnički i ekonomski prihvatljivo. Dok je u industrijskim, vodovodnim i različitim procesnim postrojenjima navedena praksa ekstenzivna [9] u postrojenjima za proizvodnju električne energije (termoelektrane, nuklearne elektrane i kogeneracijska postrojenja) uvođenje reguliranih pogona i zamjena starih, novim reguliranim, nije naročito zastupljena. Prema rezultatima ankete opisane u [8], CIGRE - Study Committee A1) osnovni se razlozi mogu navesti kako slijedi:

- tradicionalna rješenja pogona vlastite potrošnje (pumpi, ventilatora, mlinova,...) se smatraju provjerenim, pouzdanim i lako dostupnim, što se smatra važnijim od mogućih ušteda energije primjenom frekvencijski reguliranih pogona,
- nedostatak iskustva i povjerenja tradicionalno obrazovanih operatera elektrana u nove tehnologije,
- želi se potpuno iskoristiti vijek trajanja postojeće opreme,
- izbjegavanje investicija za nove tehnologije i revitalizacije korištene opreme i
- druga rješenja, npr. primjena dvostruko napajanih kolutnih asinkronih motora, hidrauličke spojke.

Navedeni će razlozi sigurno u nekim zemljama biti brže a u nekim sporije odbacivani jer se primjenom frekvencijski reguliranih pogona u termoelektranama, mogu postići znatne uštede energije i smanjiti emisiju CO₂ a uz to će i cijene i pouzdanost novih tehnologija biti znatno prihvatljivije. Kod moderne termoelektrane na ugljen može biti potrebno 5-8% ukupne njene snage za elektromotorne pogone vlastite potrošnje (zavisno o načinu pogona kotlovskih napojnih pumpi) a ako pretpostavimo po iskustvu da se primjenom frekvencijski reguliranih pogona te vlastite potrošnje može uštedjeti oko (10-20)% za njih potrebne snage, može se ukupni stupanj korisnosti termoelektrane povećati i do 1%, s dosta optimizma s 42 na 43%.

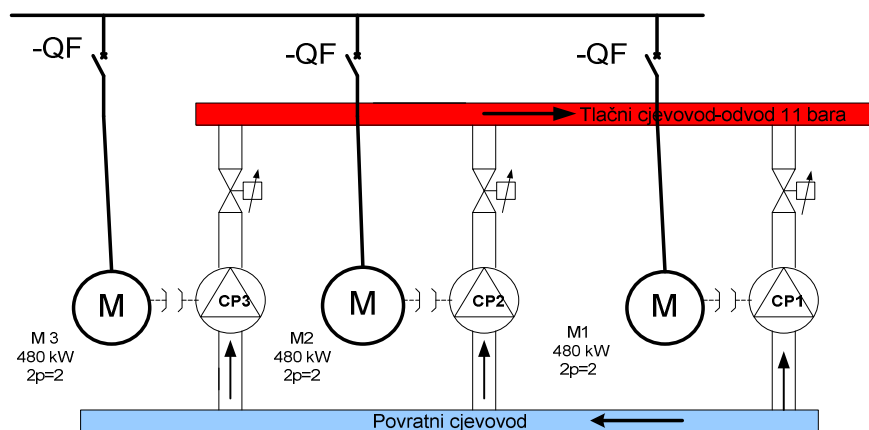
Koliko je autorima ovog rada poznato u termo objektima HEP-a nema frekvencijski reguliranih elektromotornih pogona na srednjem naponu. U TE-TO Osijek je u počecima pogon cirkulacijskih pumpi vrelovoda bio izveden sa klizno-kolutnim motorima napajanim preko podsinkronih usmjerivačkih kaskada. Takav pogon se pokazao nepouzdan uz otežano održavanje i česte kvarove koje su dovodile do nepouzdanosti i neraspoloživosti agregata.

U nastavku ovog rada prezentirati će se razlozi uvođenja jednog frekvencijski reguliranog elektromotornog pogona u TE-TO Osijek, načini tehničke realizacije, postignute uštede električne energije i primarne energije u periodu od puštanja u pogon do pisanje ovog rada, te smanjenje emisije CO₂.

2. ELEKTROMOTORNI POGON VRELOVODNIH PUMPI U TE-TO OSIJEK

2.1 Stanje prije uvođenja reguliranog pogona

Izvornim projektom elektromotorni pogoni 3 vrelovodne CP u TE-TO Osijek se direktno priključuju na mrežu 6,3 kV bez mogućnosti regulacije brzine vrtnje, a promjene tlaka na polazu vrelovoda se postižu manipulacijama tlačnim zasunima na početku vrelovoda prema Slici 1. Veličina potrebnog tlaka na polazu cjevovoda ovisi o stanju u vrelovodnoj mreži i mijenja se od sezone do sezone grijanja zbog promjena u vrelovodnoj mreži. U sezoni 2009/10. polazni tlak se održavao između 11,2 i 11,5 bara.



Slika 1. Sustav 3 vrelovodne pumpe u TE-TO Osijek

Tlak u vrelovodnoj mreži održavaju dvije od tri instalirane pumpe. Jedna je pumpa, CP1, pri tome približno nazivno opterećena a druga, CP2 ili CP3 u "buster funkciji" pomaže-dodaje potrebnu količinu medija a potrebni tlak se postiže manipulacijom tlačnog zasuna na početku vrelovoda. Prema gruboj evidenciji opterećenja ova je pumpa obično opterećena oko 60-70% nazivnog tereta. Treća je pumpa rezervna. Pumpa CP1 (za razliku od druge dvije) nema zaštitu od previsokog tlaka na polazu, a u slučaju pojave takvog tlaka ova pumpa ne ispada iz pogona već ostaje u radu (uz tlak oko 8 bar), čime se znatno smanjuju problemi u odnosu na one koji bi nastali kao posljedica ispada cijelog vrelovodnog sustava, te se olakšava kasnija uspostava traženog režima rada. Ova je pumpa uvijek u pogonu, a njen tlačni zasun je uvijek potpuno otvoren. Jedna od dvije preostale pumpe CP2 ili CP3 je u pogonu a druga u rezervi. Svejedno koja će biti u pogonu, otvorenost njenog tlačnog zasuna se podešava prema uvjetima u vrelovodnoj mreži odnosno prema zahtjevima toplane. Manipulacija tlačnim zasunima je moguća iz komandne prostorije upravljajući elektromotorom ili ručno u strojarnici, što je češći slučaj.

Do prije dvije sezone uvjeti u mreži su bili takvi da je i tlačni zasun na drugoj pumpi bio potpuno otvoren. Nakon toga je izvršeno balansiranje mreže čime su se postigli potrebni uvjeti uz znatno prigušeniji tlačni zasun na drugoj pumpi. Važno je napomenuti da na tlačnim zasunima na sve tri cirkulacijske pumpe nije moguće utvrditi kolika je relativna otvorenost tih zasuna. Opisani način postizanja traženog tlaka u vrelovodu moguć je manipulacijom tlačnim zasunima pumpi CP2 ili CP3, ovisno koja je u pogonu. Kako često treba manipulirati tlačnim zasunima ovisi o:

- promjenama temperature polaza vrelovoda, što ima za posljedicu i promjene tlaka na polazu
- temperatura polaza ostvaruje se prema zadanom dijagramu a u ovisnosti o vanjskoj temperaturi,
- promjenama tlaka u polster posudi koji se mijenja gotovo stalno i održava odzračnim ventilom,
- promjenom razine u polster posudi, do čega dolazi zbog promjena volumena vode u mreži uslijed zagrijavanja a kao posljedicu ima promjenu tlaka u polster posudi.

Za cijelo vrijeme trajanja sezone grijanja, oko 210 dana godišnje, zasun na tlačnoj strani crpke CP1 stalno je otvoren a struja motora jednaka nazivnoj, oko 51 A, a zasun na tlačnoj strani crpke koja je uz CP1 u pogonu je djelomično otvoren, struja tog motora varira između 35-38 A. Svakog je dana potrebno vršiti korekciju tlaka u polazu vrelovoda na način da se manje ili više otvara ili zatvara tlačni zasun na CP2 ili CP3. Konstantno je u planu povećavanje broja indirektnih toplinskih stanica u mreži, čega je posljedica smanjivanje tlaka u vrelovodnoj mreži i češća potreba za održavanjem vrelovoda.

2.2 Pogonski visokonaponski motori i cirkulacijske pumpe

Cirkulacijske pumpe vrelovoda U TE-TO Osijek pogone tri visokonaponska asinkrona kavezna motora 6,3 kV, 50 Hz, proizvođača Končar-GIM, Zagreb. U Tablici I. su dani osnovni podaci.

Tablica I. Popis i podaci visokonaponskih asinkronih motora u TE-TO OSIJEK

Radni stroj	Tip motora	Tv. broj	Snaga kW	Napon kV	Brzina o/min	cos φ	Koris. η%	Struja A
Cirk. pumpa vrelovoda CP1	6AZJ6 450S1-2	932528	480	6,3	2980	0.88	94**	52
Cirk. pumpa vrelovoda CP2	7AZJ6 454-02	945076	480	6,3	2980	0.90	96	51
Cirk. pumpa vrelovoda CP3	9AZJ6 452-02	22369	480	6,3	2980	0.90	96	51

** Vrlo niska korisnost motora

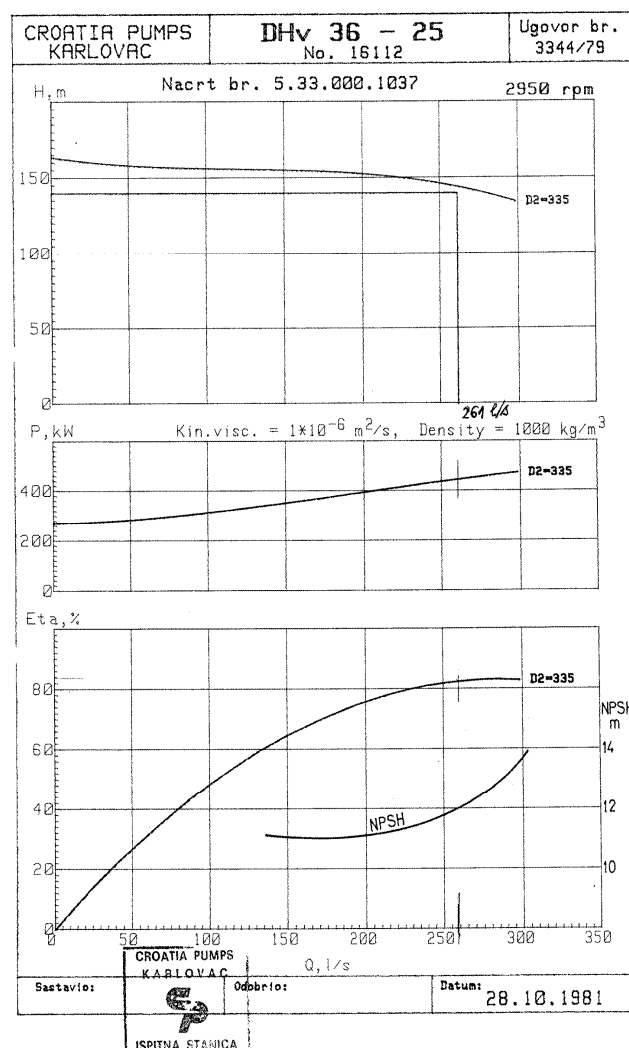
Sva su tri pogonska asinkrona motora izvedena u izolacijskoj klasi F s namotima statora impregniranim u vakuumu. Ležajevi su kotrljajući i potrebno ih je mijenjati svakih 3-4 godine, ovisno o ukupnom broju sati pogona. Zbog velike brzine vrtnje kotrljajući ležajevi se brzo troše pa je njihova zamjena nakon 20 000- 25 000 sati pogona normalna. Navedeni motori nemaju ugrađene električki izolirane ležajeve niti uzemljenje osovine što je neophodno da se elektromehanički sustav (izolacijski i ležajevi) motora zaštiti od utjecaja prenapona i nesimetričnosti generiranih u sustavu pretvarača. Kako se to obično zahtjeva za sve motore snaga većih od par desetaka kW ovi motori bez rekonstrukcije ne bi bili upotrebljivi za napajanje iz frekvencijskih pretvarača standardne izvedbe. Tehnička je regulativa usmjerena na koordinaciju između proizvođača motora i proizvođača pretvarača frekvencije. Proizvođač pretvarača postavlja zahtjeve na motor, kabele i komponente pogona polazeći od izlaznih podataka iz pretvarača. Proizvođač motora očekuje što manje zahtjeve na prilagodbu motora pretvaraču.

Normama IEC 60024-17 te IEC 60034-25, su definirani zahtjevi na izvedbu izolacijskog sustava motora, te na izvedbu kojom se sprječavaju utjecaji osovinskih napona i ležajnih struja kao posljedica

viših harmoničkih članova i nesimetrija koje generira sustav pretvarač frekvencije + priključni kabel + motor. Zbog napretka u razvitku i gradnji pretvarača vodeći svjetski proizvođača više ne traže posebni izolacijski sustav motora za primjenu na pretvaraču frekvencije već povećano naprezanje izolacijskog sustava, koji proizlaze iz primjene pretvarača, rješavaju dogradnjom dodatnih uređaja u pretvarač, sinusnih filtera na izlazu iz pretvarača. Takvi filteri eliminiraju brzi porast napona dv/dt i smanjuju naprezanje izolacijskog sustava motora. Filteri bitno utječu na povećanje cijene pretvarača ali omogućuje primjenu motora standardne izvedbe (opće namjene), bez posebnih zahtjeva na izolacijski sustav motora. **Primjena pretvarača s višerazinskom pretvorbom napona smanjuju ili eliminiraju potrebe ugradnje filtera.**

2.3 Cirkulacijske pumpe

U TE-TO Osijek ugrađene su cirkulacijske pumpe proizvođača CROATIA PUMPS, DHv 36-25 horizontalne 26 l/s, 140 mH₂O, No 300, godina izrade 1981. Karakteristike pumpe se vidi na Sl. 2. Budući da je prošlo skoro 30 godina od njihove izrade (1981.) a preko 20 godina od njihove eksploatacije perspektiva njihove daljnje upotrebe nije dobra. Stupanj korisnosti pumpi je relativno nizak samo 82%.



Slika 2. Karakteristike cirkulacijske pumpe u TE-TO Osijek

2.4 Razlozi za ugradnju jednog reguliranog elektromotornog pogona

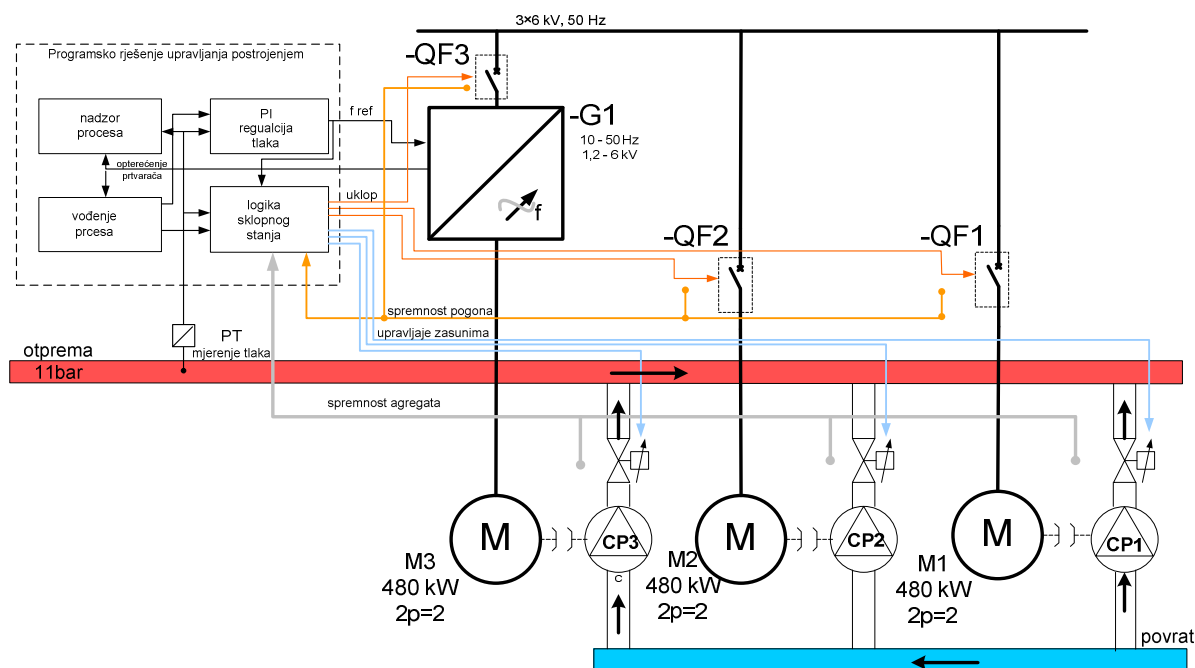
Uvođenjem reguliranog pogona jednog pumpnog agregata u TE-TO Osijek može se ostvariti:

- Poboljšanje tehnološkog procesa upravljanjem brzinom vrtnje jednog pumpnog agregata umjesto manipulacije tlačnim zasunima u svrhu održavanja tlaka na polazu vrelova;
- Poboljšanje i pojednostavljenje zaštite mreže, motora i radnih mehanizama od stresnih stanja pokretanja i zaustavljanja pogona. Komponente pogona (pumpa, motor, sklopne aparature, sabirnice, transformatori) štite se na način da se smanjuju struje pokretanja, dinamičke sile i momenti te zagrijavanja u toku zaleta. U pretvaraču frekvencije su integrirane i električke zaštite motora (kratki spoj, preopterećenje, nesimetrije, ispad jedne faze....);
- Reguliranim pogonom centrifugalnih pumpi, koje su značajnije pod opterećene u normalnom pogonskom stanju i koje su godišnje relativno dugo sati u pogonu mogu se postići znatne uštede električne energije, ako se protok i/ ili tlak reguliraju brzinom vrtnje umjesto prigušenjem ili nekim drugim klasičnim metodama.
- Rasteretiti pogonsko osoblje dnevnih obaveza upravljanja ventilima u periodu jutarnjeg povećanja polazne temperature vrelova te večernjeg snižavanja iste.

2.5 Izbor agregata za reguliranje brzine vrtnje

Iz Tablice I. je vidljivo da pogonski motor pumpe CP1 ima vrlo nisku korisnost, samo 94%, stoga bi bilo najbolje da se taj motor što manje koristi. S aspekta ušteda energije najbolje je da agregat CP2 radi stalno pod nazivnim opterećenjem a da funkciju „buster pumpe” preuzima agregat CP3 kojemu se brzina vrtnje elektromotora upravlja regulacijom frekvencije i napona. Ovakvim izborom cirkulacijska pumpa CP2 uvijek radi na nazivnim parametrima opterećenja i glavna je odnosno vodeća pumpa u tehnološkom procesu. Regulirana pumpa CP3 je buster i preuzima prateću pumpu u procesu čija je funkcija održavati zadani tlak na polazu vrelova. Zbog nekih pogonskih razloga za sada je CP1 vodeća CP3 regulirana prateća a CP2 rezervna pumpa (vidi Sl. 3).

Sve tri pumpe imaju istu relativno nisku korisnost a budući da nije planirana nabavka nove pumpe kriterij najveće korisnosti agregata može se birati prema pogonskom VN motoru.



Slika 3. Nova konfiguracija cirkulacijskih pumpi sa sustavom regulacije tlaka promjenom brzine vrtnje motora M3 pretvaračem frekvencije

2.6 Pretvarač frekvencije

Nabavljen je i instaliran pretvarač frekvencije Siemens Robicon Perfect Harmony. Osnovni su podaci pretvarača prema [10] iskazani u Tablici II.

Tablica II: Tehnički podaci pretvarača Siemens ROBICON PERFECT HARMONY
GEN IV **6SR4102-2GB37-0BG0-Z**

Podaci pretvarača na mrežnoj strani:

Napojna mreža:	3AC, 6300V +/- 10%	50Hz
Nazivna ulazna struja:	58A	
Faktor snage na mreži:	0,95	
Ispravljač:	30 pulsni ispravljački most	
Gubici pri nazivnom opterećenju uključujući i transformator:	22kW	
Stupanj korisnosti:	96,5%	

Podaci na izlazu iz pretvarača:

Izlazni napona:	3AC 0-6300V	10 -167Hz
Nazivna izlazna struja:	0-70A	
Vrsta pogona:	kontinuirani	
Tip opterećenja:	asinkroni motor	
THD strujni:	</= 3%	

Podaci transformatora:

Primarni napon transformatora:	6300 V
Sekundarni napon transformatora:	750 V (15x)
Nazivna snaga transformatora:	700 kVA
Vektorska grupa:	Yd (15x)
Nazivna struja:	64,1 A / 35,9 A (15x)
Temperatura namota	155 °C
Nadtemperatura:	110°C
Napon kratkog spoja:	7,6 %
Metoda hlađenja:	AF = 2,0 m/s
Ukupna masa	2,8 tona
Radna temperatura okoline:	45°C

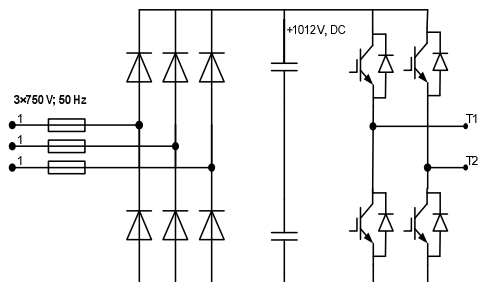
Jednofazno pomoćno napajanje iz UPS-a:

Nazivni napon:	230V ± 10%
Nazivna frekvencija:	50 Hz ± 3%
Potrošnja pomoćnih krugova:	približno 10A

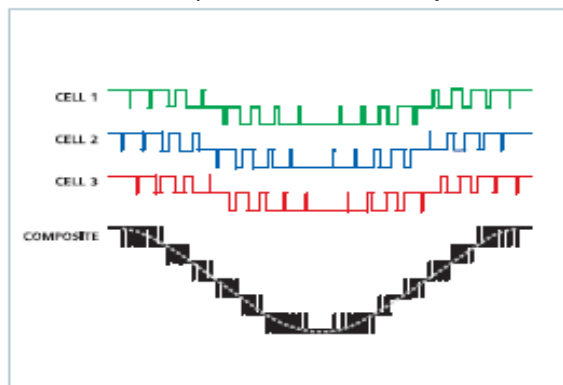
Mjere i hlađenje

Ukupne dimenzije ormara: (DxŠxV, mm):	4165x1250x2990 mm
Stupanj mehaničke zaštite ormara:	IP42
Broj montažnih cjelina:	1
Masa najveće montažne cjeline:	5.500 kg
Metoda hlađenja:	AF (prisilno hlađenje)
Protok zraka:	4,5 m ³ /s
Buka u radu:	82 dB(A)

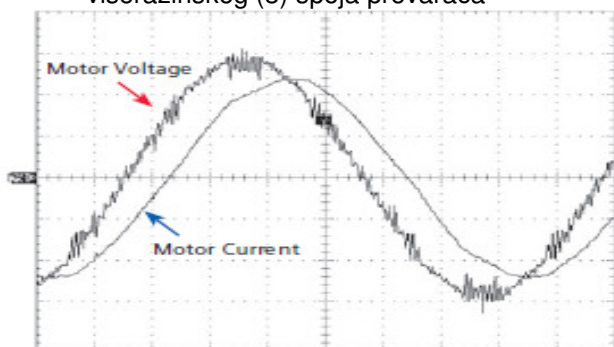
Radi se o pretvaraču s višerazinskom pretvorbom izlaznog napona sa serijski povezanim invertorskim jedinicama (ćelijama) prema Sl. 4a. Ovisno o potrebnom izlaznom naponu povezuje se 3 do 6 ćelija nazivnog ulaznog napona 3x750V, 50 Hz. U ovom slučaju serijski je spojeno 5 ćelija (Sl.4d). Svaka ćelija priključena je na jedan sekundar ispravljačkog transformatora a trofaznom ispravljanjem se dobiva 1010 V istosmjerno. Iz tog se napona sa četiri IGBT sklopke ponovno formira izmjenični napon a serijskim povezivanjem postiže potrebni izmjenični trofazni sustav srednjeg napona. Sekundarni namoti u z-spoju fazno su pomaknuti (+15°, +7.5°, 0°, -7,5°, -15°) te se na taj način prema mreži ovaj spoj ponaša kao 30 pulsni ispravljač s malim sadržajem viših harmonika (Sl. 4b). Odgovarajućim širinsko impulsnim upravljanjem IGBT sklopki formirani izlazni izmjenični napon ima snižene harmoničke članove nižeg reda te je struja motora bliska sinusnom obliku s THDI</= 3% (Sl. 4c). Time su dodatni gubici u motoru značajno smanjeni. Veliki broj komponenti od kojih je sastavljan pretvarač smanjuje njegovu raspoloživost u odnosu na pretvarače s manjim brojem komponenti. Taj se nedostatak dijelom umanjuje mogućim radom pretvarača s jednom premošćenom ćelijom uz proporcionalno snižen maksimalni izlazni napon.



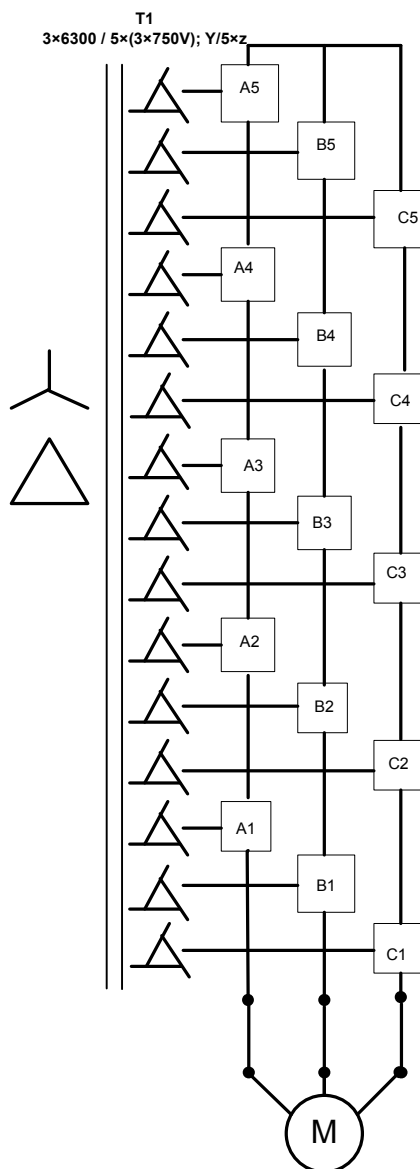
Slika 4a: Shema jedne ćelije niskonaponskog modula pretvarača frekvencije



Slika 4b: Princip tvorbe izlaznog napona višerazinskog (3) spoja prevarača



Slika 4c: Oblik napona i struje motora napajanog iz pretvarača Perfect harmony



Slika 4d. Shema pretvarača s 5 ćelija niskonaponskih modula 750 V po fazi za izlazni napon do 3x6300 V

Opisana tehnologija pretvarača omogućava da se zahtjevi na prilagodbu izvedbe motora za frekvencijsku regulaciju brzine svode na standardne zahtjeve izvedbe modernih motora opće namjene, a to znači da izolacijski sustav motora bude u klasi F i vakuum tlačno impregniran. To su danas standardne izvedbe novih serija motora srednjeg napona. Takav je izolacijski sustav ugrađen u visokonaponske motore TE-TO Osijek pa se s toga aspekta motori mogu regulirati odabranim pretvaračima, što je u projektu pogona navedeno i što garantira proizvođač pretvarača.

Ovakvi su pretvarači znatno skuplji od standardnih a na Investitoru je odluka, skupi pretvarač i postojeći motor ili standardni pretvarač i posebno građeni ili adaptirani motor.

2.7 Sustav vođenja i upravljanja

Principna blokovska shema programskog rješenja upravljanja cirkulacijskim vrelovodnim pumpama je prikazana je na slici 3. Uvođenje jednog reguliranog pogona omogućava regulaciju tlaka u rasponu potrebnog protoka medija, praktično od minimalnog ($0 \text{ m}^3/\text{s}$) do maksimalnog. Pri tome je regulirani pogon pumpe CP3 trajno u radu a po potrebi većeg protoka uključuje se neregulirani pogon pumpe CP1 ili CP2 ovisno o stanju spremnosti pogona i pumpe. Operateru u postrojenju omogućen je izbor pogona u radu, ciklus puštanja u rad, te intervencije prema potrebi procesa. Regulacija tlaka na

polaznom cjevovodu ostvaruje se upravljanjem brzine vrtnje reguliranog pogona. Regulator tlaka je riješen programski u nadređenom upravljačkom sustavu korištenjem PI funkcijskog bloka Simatic STEP 7. Tlak se zadaje prema potrebi sustava grijanja, a prema stvarnom tlaku mjenom davačem PT na polazu vrelovoda. Regulator zadaje potreban vodeći signal brzine vrtnje pretvaraču frekvencije koji napaja motor regulirane pumpe CP3. Pri postizanju maksimalne brzine ove pumpe, kroz funkcije bloka logike upravljanja, pokreće se pogon pumpe konstante brzine CP1. To za posljedicu ima sniženje brzine regulirane pumpe i održavanje zadanog tlaka. Brzinom djelovanja regulacijskog kruga tlaka se eliminiraju nepotrebna povećanja tlaka pri direktnom uklopu neregulirane pumpe. Svi signali stanja pogona prikupljaju se, prikazuju i spremaju u bloku nadzora rada postrojenja.

2.8 Procjena utjecaja frekvencijskog pretvarača na trošila razvoda 6 kV i 0,4 kV

Za ugrađeni pretvarač Siemens Robicon Perfect Harmony tipske oznake **6SR4102-2GB37-0BF0-Z** se navodi u tehničkoj dokumentaciji [3] da ispunjava sve uvjete koji se postavljaju na sadržaj viših harmonika i distorzije napona u pojnoj mreži prema svim relevantnim normama. Navedeno je da je THD strujni < 3%. Pretvarač sadrži u kompletu i transformator na strani mreže kojim se bitno utječe na veličinu viših harmonika. U ovoj izvedbi transformatora s pet sekundara po fazi i s pomakom u fazi te ispravljačima za svaku ćeliju, pretvarač je prema mreži teret s 30 pulsним ispravljanjem čime su svi harmonici struje mreže do 29 reda praktički eliminirani. Zbog navedenoga nije potrebno posebno računati utjecaj ovog pretvarača na prilike u mreži a mjerenjem bi bilo korisno provjeriti stvarno stanje.

3. POSTIGNUTI REZULTATI

3.1 Uštede energije

Moguće uštede električne energije za pogon cirkulacijskih pumpi računat će se korištenjem dokumentacije dobivene iz arhive TE-TO Osijek za sezonu grijanja prije ugradnje i za period nakon ugradnje reguliranog pogona, te raspoloživih tehničkih podataka za upotrijebljene motore i pumpe. Osnovni su podaci o pumpama prikazani na Sl.2, a o pogonskim motorima u Tablici I.

Stanje prije uvođenja reguliranog pogona (siječanj 2012.)

Podaci prikupljeni u TE-TO Osijek u pogonskim uvjetima rada pumpi u periodu grijanja: Pumpa CP1 radi s punim opterećenjem, struja motora varira oko 51,67 A. Pumpa CP3 u "booster funkciji" s prigušenjem, struja motora varira oko 36,21 A, napon na sabirnicama oko 6,3 kV, 50 Hz.

Snaga iz mreže na odvodu za pogon motora pumpe CP 1, prosječno kroz 24 sata pogona je:

$$P_{CP1} = \sqrt{3} U I \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 51,67 \cdot 0,95 = 535 \text{ kW}$$

Snaga iz mreže za motor prigušene pumpe CP3 pri mjerenoj struji oko 36,21 A

$$P_{CP3} = \sqrt{3} U I \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 36,21 \cdot 0,95 = 375 \text{ kW}$$

Objе pumpe zajedno trebaju snagu iz mreže iznosa

$$P_{nr} = 910 \text{ kW}$$

Stanje nakon uvođenja regulacije pumpe CP3 (veljača 2013.)

Pogonski podaci regulirane pumpe CP3 su prikazani u Tablici III. a izvučeni su iz frekvencijskog pretvarača pomoću programa za nadzor statusa i grešaka koje koristi osoblje održavanja.

Pumpa CP1 radi s punim opterećenjem, struja opterećenja motora, iz podataka mjerenja na sabirnicama 6,3 kV mreže varira oko 52 A.

Snaga koju motor pumpe CP 1 uzima iz mreže, prosječno kroz 24 sata pogona, je približno

$$P_{CP1} = \sqrt{3} U I \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 52 \cdot 0,95 = 538,5 \text{ kW}$$

Snaga iz mreže za regulirani pogon je prema Tablici III. (pretvarač drži na mreži $\cos \varphi = 0,99$)

$$P_{CP3R} = 218,42 \text{ kW}$$

i troši se u ispravljačkom transformatoru, pretvaraču i motoru pumpe tj. na sve što obuhvaća regulirani pogon (gubici pretvarača uključujući i transformator su 22 kW prema dokumentaciji isporučitelja).

Tablica III Pogonski podaci pogona regulirane pumpe CP3

Operation	Status	SOP	Faults/Alarms	Networks	Files	Logs	About
Tool	Line Side Data			Motor Side Data (OLVC) Run			
Voltage:	6393.61 Volts			Voltage:	5285.59 Volts		
Current:	20.01 Amps			Current:	27.09 Amps		
Frequency:	50.02 Hz			Motor Speed:	83.47 %		
Power:	218.42 kW			Speed Demand:	83.49 %		
Power Factor:	0.99			Speed Reference:	83.49 %		
Tap Setting:	0.00			Flux Reference:	1.00 %		
				Measured Flux:	1.00 %		
				Speed Rollback:	OFF		
Active Cells:	A	B	C	Spinning Load:	OFF		
	5	5	5	Power Factor:	0.86		
				Over Modulation:	Enabled		

Ukupno pogon s jednom reguliranom pumpom uzima iz mreže snagu

$$P_r = 756,92 \text{ kW} .$$

Razlika u ukupnoj snazi uzimanoj iz mreže prije i poslije uvođenja reguliranog pogona CP3 je

$$\Delta P = 910 - 756,92 = 153,08 \text{ kW}$$

Broj godišnjih sati pogona vrelovoda (grijanja) statistički je oko 5040, to je 210 dana po 24 sata.

Ekonomski efekti uvođenja reguliranog pogona

Ušteda energije, po sezoni grijanja, nakon uvođenja reguliranog pogona CP3 je oko

$$W_g = 153,08 \cdot 5040 = 771\,523 \text{ kWh}$$

Računamo li s estimiranom srednjom godišnjom cijenom električne energije, na tržištu u našem okruženju, 60 EUR/MWh uštede energije po sezoni grijanja vrijede

$$C_{ug} = 46\,291 \text{ €}$$

Prema podacima investitora ukupna je investicija s neophodnim rezervnim dijelovima za navedeni pogon iznosila oko 200 000 €. Pojednostavljenim izračunom vremena povratka investicije t_{po} , (engl. payback time) kada bi se računalo sa tržišnom cijenom energije dobije se

$$t_{po} = \frac{\text{investicija u EUR}}{\text{Godišnja ušteda energije u EUR}} = \frac{200\,000}{46\,291} = 4,32 \text{ godina}$$

Ako se želi umjesto navedenog pojednostavljenog računanja vremena isplativosti investicije provesti preciznije izračune potrebno je raspolagati informacijama kao što su kamatne stope za investirani kapital, estimirane godišnje promjene cijena električne energije, očekivana inflacija, troškovi održavanja , stopa i način otpisa (amortizacije) nabavljene oprema, porez na dobit te još neki podaci ovisni o ekonomiji i zakonima pojedine zemlje. U nedostatku takvih vjerodostojnih podataka može se prihvatiti provedeni pojednostavljeni izračun ekonomske vrijednosti investicije. Tome u prilog ide činjenica da je vrijeme povratka investicije računato pojednostavljeno oko 4 godine, pa ga utjecaj kamata, porasta cijene energije i drugih promjenljivih parametara ne može znatnije promijeniti.

Uštede primarne energije – gorivo mazut

Pretpostavimo li da litra mazuta sadrži prosječno oko 11 kWh energije, da je korisnost klasične termoelektrane na mazut oko 40% , te da su gubici u prijenosu i transformaciji do motora prosječno 12%, s naslova ušteda postignutih reguliranim pogonom u jednoj godini smanjila bi se potrošnja mazuta za

$$\Delta_m = \frac{771\,523}{11 \cdot 0,40 \cdot 0,88} = 199\,256 \text{ litara}$$

U suvremenim kogeneracijskim postrojenjima ukupni stupanj djelovanja termoelektrane - toplane iznose oko 60%, što je prema ostvarivo u razdoblju sezone grijanja i u TE-TO Osijek. U takvim bi pogonskim uvjetima smanjena potrošnja mazuta iznosila 132 837 l/ po sezoni grijanja. Ako uštede prikazemo kroz smanjenu količinu potrošenog mazuta i uzmemo u račun njegovu cijenu, 0,52 €/l po kojoj je nabavljen za TE-TO Osijek početkom lipnja 2013.,dobijemo estimiranu novčanu vrijednost uštede u mazutu po sezoni grijanja.

$$C_{ugm} = 132\,837 \cdot 0,52 = 69\,075 \text{ €}$$

Uštede primarne energije – gorivo prirodni plin

Ako se kao primarno gorivo koristi prirodni plin, prosječne ogrjevne vrijednost $1\text{Sm}^3 = 9,26 \text{ kWh}$ dobiju se nešto drugačiji rezultati. Računamo li s prosječnom cijenom plina oko 0,4 €/m³ koja se u razmatranom periodu obračunava za TE-TO Osijek, uštede su u količini plina i u nabavnoj cijeni po sezoni grijanja:

$$\Delta_{pl} = \frac{771523}{9,26 \cdot 0,60 \cdot 0,88} = 157\,798 \text{ Sm}^3 \quad C_{ugpl} = 157\,798 \cdot 0,4 = 63\,120 \text{ €}$$

Ako računamo vrijeme povrata investicije preko cijena ušteđenog primarnog goriva, mazuta i/ili plina koji se kombinirano koriste u TE-TO Osijek, dobijemo slijedeće rezultate:

Gorivo samo mazut

$$t_{po} = \frac{\text{investicija u EUR}}{\text{Godišnja ušteda mazuta EUR}} = \frac{200\,000}{69\,075} = 2,9 \text{ godina}$$

Gorivo samo plin

$$t_{po} = \frac{\text{investicija u EUR}}{\text{Godišnja ušteda plina EUR}} = \frac{200\,000}{63\,120} = 3,17 \text{ godina}$$

U periodu kada TE-TO Osijek proizvodi samo električnu energija ukupni je stupanj djelovanja oko 30%.

3.2 Smanjenje emisije CO₂

Naročito važnim pitanjem pri računanju ušteda električne energije uvođenjem reguliranih elektromotornih pogona je smanjenje emisije CO₂ zbog smanjene potrošnje primarnog goriva. Prema "100 Top Energy Saving, ABB Publication, 18.10.2002" uzima se da prosječna emisija CO₂ iznosi 0,5 kg/kWh proizvedene električne energije. Tu se radi o modernim proizvodnim jedinicama. Izračunati podaci o proizvodnji CO₂ po MWh električne energije za nekoliko posljednjih godina pogona Bloka 45 MW u TE-TO Osijek su:

- Cijela 2012. (upotreba vrlo malo mazuta) 1,11 t/MWhe
- Cijela 2011. (upotreba više mazuta) 1,25 t/MWhe
- U 12/2012. i 01/2013. (samo plin, hladnije) 1,04 t/MWhe
- U 11/2012. (samo plin, toplije-više struje) 0,98 t/MWhe
- U nekoliko mjeseci 2005. (samo mazut) 1,60 t/MWhe

U nedostatku preciznijih podataka za TE-TO Osijek računat ćemo da je emisija CO₂ pri korištenju samo mazuta u sezoni grijanja 1,6 t/MWhe, a samo prirodnog plina 1,04 t/MWhe.

Smanjenje emisije (proizvodnje) CO₂ ako se kao gorivo koristi samo mazut bi s naslova ušteda električne energije bi iznosilo

$$\Delta_{co2} = 771,523 \cdot 1,6 = 1234 \text{ t / sezoni}$$

a ako se kao gorivo koristi samo plin

$$\Delta_{co2} = 771,523 \cdot 1,04 = 802 \text{ t / sezoni}$$

Neproizvedena emisija CO₂ izražena kao benefit u novcu obračunava se 10 €/t pa bi s toga naslova ušteda po sezoni grijanja ovisno o pogonskom gorivu iznosila:

Pogonsko gorivo mazut	$U_{CO_2} = 1234 \cdot 10 = 12\,340 \text{ €}$
Pogonsko gorivo plin	$U_{CO_2} = 802 \cdot 10 = 8\,020 \text{ €}$

Izračunamo li ukupnu bilancu s naslova ušteda energije uvođenjem frekvencijski reguliranog pogona jedne cirkulacijske pumpe, polazeći od prikaza stvarnih troškova izraženih kroz uštede primarnog goriva i zbog neproizvedene emisije CO₂ za dvije vrste pogonskog goriva dobijemo slijedeće rezultate:

mazut : Ušteda u količini mazuta 69 075 €, ušteda u emisiji CO₂ 12 340 €, ukupno 81 415 €
plin : Ušteda u količini plina 63120 €, ušteda u emisiji CO₂ 8 020 €, ukupno 71 140 €

Vrijeme povratka investicije

Pogonsko gorivo mazut $t_{po} = \frac{200\,000}{81\,415} = 2,45$ godina

Pogonsko gorivo plin, $t_{po} = \frac{200\,000}{71\,140} = 2,8$ godina

Komentar ušteda energije i perioda povratka uložениh sredstava

U vodovodnim i raznim industrijskim postrojenjima gdje elektromotorni pogoni rade cijele godine, ponekad i do 8000 sati godišnje, period povratka investicija je mnogo kraći pa je stoga u takvim postrojenjima vrlo česta ugradnja novih reguliranih pogona i zamjena starih nereguliranih pogona reguliranim. U našem slučaju pogoni rade samo oko 5040 sati (sezona grijanja) te su stoga i računate godišnje uštede energije znatno manje ali još uvijek vrlo isplative.

Prema rezultatima izračuna ušteda energije temeljenim na podacima mjerenja u TE-TO Osijek i estimirane cijene električne energije od oko 60 EUR/MWh, vrijeme povratka uložениh sredstava, bi moglo biti oko 4 godine. To vrijedi ako bi se energija kupovala na tržištu u okruženju.

Realnija varijanta ekonomskih vrijednosti ugradnje reguliranog pogona je računanje preko ušteda količine goriva koja se koriste u TE-TO Osijek i ušteda zbog neproizvedene količine CO₂. Takve računice, iako približne zbog za sada nedostatka točnih podataka, pokazuju da je vrijeme povratka investicije između 2,5 i 2,8 godina, ovisno o gorivu i njegovoj trenutnoj cijeni.

4. ZAKLJUČCI

Uvođenje reguliranog elektromotornog pogona jedne cirkulacijske pumpe u sustavu vrelovodnog postrojenja u TE-TO Osijek je ekonomski i tehnološki potpuno opravdano jer:

- se mogu postići godišnje uštede energije i do 771 MWh što na tržištu el. energije može postići vrijednost do 46260 EUR-a,
- je period povratka investicije je između 2,5 i 3 godine, nakon toga se može uštedjeti oko 70 000-80 000 € po sezoni grijanja, ovisno o vrsti primarnog goriva, i taksi za emisiju CO₂,
- postojeći motori ne zahtijevaju prilagodbe instaliranim frekvencijskim pretvaračima,
- je tehnološki proces bitno unapređen, pokretanje motora i pumpi je polagano (princip softstart), električke i mehaničke komponente pogona i razvoda energije su štice uređajima ugrađenim u frekvencijski pretvarač i jer
- se smanjuje emisija CO₂ u rasponu od 800 - 1200 tona po sezoni grijanja.

5. LITERATURA

- [1] D. Ban, M. Puzak, Ugradnja reguliranih elektromotornih pogona u TE-TO Osijek, tehničke podloge i ekonomska analiza, elaborat, FER, ZESA Zagreb 2011.
- [2] Medium voltage AC drive, ACS 2000,400-1000 kVA, 6,0-6,6 kV, ABB Product Brochure.
- [3] The Air-Cooled Medium Voltage Drive of Choice, Robicon Perfect Harmony Siemens, 2008.
- [4] Drives for water Industry Siemens, Inovative technology for the highest availability and cost-effectiveness. Siemens, 2008.
- [5] Guide to Harmonics with AC Drives, Technical Guide No. 6 ABB.
- [6] Pumpe Save 4.1, ABB User's Manual, 2008.
- [7] IEC 60034-25, 2002.
- [8] Study Committee A1- Electrical Rotating Machines Advisory Group A1-06 Questionnaire WG A1.27, ASDs' and high-efficiency motors' application in Power Plants, Beijing, 11 Sept. 2011.
- [9] 100 Top Energy Saving, ABB Publication, 18.10. 2002.
- [10] Izvedbena dokumentacija Siemens E-VV007-11-0-E01-3.