

Ugotavljanje energijske učinkovitosti frekvenčno vodenega pogona vodne črpalke v industrijskem hladilnem sistemu

Henrik Lavrič, Klemen Drobnič, Rastko Fišer

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana
E-pošta: henrik.lavric@fe.uni-lj.si, klemen.drobnic@fe.uni-lj.si, rastko.fiser@fe.uni-lj.si

Energy efficiency assesment of variable speed pump in industrial cooling system

Abstract. *Energy policy of the European Union strives for lower greenhouse gases emissions by lowering the overall energy consumption, by introducing more renewables and by improving the energy efficiency. In coherence with the latter item, energy audits must be conducted every four years in larger companies in order to comply with the directive 2012/27/ES. In this paper a comprehensive approach for determination of energy efficiency indicators for drives without an archive of electrical parameters is presented. Functional relationship between electrical and hydraulic parameters is established by means of measurements. Then an analytical procedure is developed to calculate electrical power and drive efficiency out of archived hydraulic parameters. It was found out that the analysed drives are heavily oversized and the overall efficiency is low, less than 60 %. Improvement in efficiency can be made in range of 15 % by using new properly sized pump and electric motor.*

1 Uvod

Odgovorna raba energije s ciljem ohranjanja energetskega zalog in zmanjšanja škodljivih emisij je poleg zmanjšanja stroškov za energijo zelo velik izziv novodobnega sveta. Izboljšanje energijske učinkovitosti je eden izmed najpomembnejših ciljev energetske politike in strategije v razvitih državah. Zmanjšanje energijske odvisnosti (delež uvožene energije v oskrbi z energijo) in podnebne spremembe predstavljata ključna izziva za vse članice Evropske unije (EU). Energijska odvisnost Slovenije je bila najvišja v letu 2008, ko je znašala 54,8 %, v letu 2017 pa je bila še vedno na visokih 47,5 % [1]. Slovenija naftne derivate in zemeljski plin uvaža v celoti, premog in električno energijo pa delno.

V splošnem obstajata dva dejavnika, ki lahko spodbudita k izboljšanju energijske učinkovitosti, in sicer tehnološke inovacije in prilagoditev deleža porabe energentov. V Sloveniji predstavlja industrija skoraj 25 % celotne porabe končne energije [2]. Po podatkih statističnega urada Republike Slovenije se je v obdobju od leta 2010 do leta 2013 končna poraba energije v industrijskem sektorju zmanjšala za 6 %, v obdobju med letoma 2000 in 2013 pa za več kot 18 %, trend porabe zadnjih let pa je zopet pozitiven [1]. Na žalost je bil upad v omenjenem obdobju precej bolj posledica recesije kot pa učinek smernic evropske direktive na področju energijske učinkovitosti, ki diktira zmanjšanje izpustov toplogrednih plinov za 20 %, povečanje deleža

obnovljivih virov na 20 % ter zmanjšanje porabe energije za 20 % do leta 2020 glede na leto 2005. Električna energija v industriji je v letu 2016 predstavljala največji delež (43 %) porabe končne energije, zemeljski plin 34 %, ostala fosilna goriva 10 % (trdna goriva 3 %, naftni proizvodi 7 %), toplota 4 % ter obnovljivi viri in odpadki 9 % [1]. Zaradi omenjenih direktiv na področju energijske učinkovitosti je potrebno v večjih industrijskih obratih izvajati redne energetske preglede najmanj vsaka 4 leta od datuma zadnjega energetskega pregleda, kar določa direktiva 2012/27/ES.

Pri iskanju izboljšav za doseganje višjega izkoristka so bistvenega pomena električni pogonski sistemi (EPS), ki tvorijo povezavo med oskrbo z električno energijo in večino mehanskih in hidravličnih procesov. V industrijskih obratih EPS porabljajo kar dve tretjini električne energije [3], zato je njihovo učinkovito delovanje bistveno z vidika dvigovanja energijske učinkovitosti. Ocenjuje se, da EPS predstavljajo med 43 % in 46 % celotne svetovne porabe električne energije, kar povzroča približno 6.040 Mt emisij CO₂ [4]. Do leta 2030 bi se brez celovitih in učinkovitejših ukrepov politike energijske učinkovitosti vrednost emisij CO₂ lahko povečala za 40 % [4].

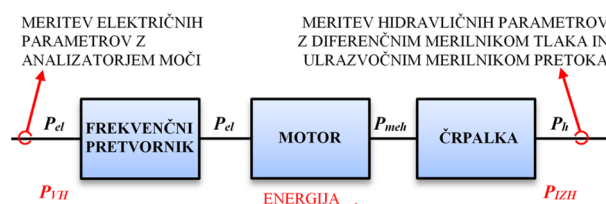
Waide in Brunner [4] ugotavljata, da bi ob uporabi motorjev z najboljšimi izkoristki prihranili od 4 % do 5 % celotne porabljene električne energije. Če bi k temu dodali primerne elektromehanske rešitve na bremenski strani, bi prihranili dodatnih 15 % do 25 %. Skupno bi izboljšali energijsko učinkovitost za 20 % do 30 %, kar bi zmanjšalo skupno svetovno povpraševanje po električni energiji za približno 10 %. Izkoristke lahko v industrijskih procesih povečamo z:

- uporabo ustrezno velikih in energijsko učinkovitih motorjev,
- uporabo frekvenčnih pretvornikov v pogonih, kjer je to smiselno,
- optimizacijo celotnega sistema, vključno z ustrezno velikimi cevovodi in vodniki,
- energijsko učinkovitimi stroji za pretvorbo mehanske energije (črpalke, ventilatorji, kompresorji, ...), ki zagotavljajo zahtevane pogoje z minimalnimi izgubami.

Brez poglobljene presoje omenjenih predlogov lahko številne ovire in motnje otežijo ali onemogočijo uresničitev prihrankov v trenutnem tržnem okolju.

V prispevku je predstavljen postopek ugotavljanja energijske učinkovitosti EPS na način, kot ga izvede podjetje, ki se zaveda potencialnih prihrankov in zato k izvajanju energetskih pregledov resno pristopi. Analiza je izvedena na podlagi arhiviranih podatkov procesnih

frekvenčnega pretvornika merili z analizatorjem moči (PPA5530, Newtons4th), hidravlične parametre na izhodni strani črpalke pa s pomočjo diferenčnega merilnika tlaka (DP-4000, Klay Instruments) in ultrazvočnega merilnika pretoka (Fluxus ADM 6725, Flexim). Merjene vrednosti iz analizatorja so se shranjevale na prenosni računalnik preko namenskega programa, hidravlični parametri pa v podatkovni shranjevalnik (Almemo 2890-9). Ker moramo za pravilno določevanje izkoristka imeti na voljo istočasne odčitke vrednosti vhodnih in izhodnih količin, smo poskrbeli za sinhronizirano beleženje podatkov. V obeh sistemih smo nastavili čas vzorčenja na eno sekundo ter nato pri posamezni točki istočasno sprožili zajemanje podatkov v obeh sistemih in merili po eno minuto.



Slika 2. Principialna blokovna shema pogona z označenimi merilnimi mesti električnih in hidravličnih količin.

Meritve obratovalnih parametrov frekvenčno vodenega pogona smo izvajali tako, da smo pri določenem prednastavljenem dušenju v sistemu stopenjsko spreminjali hitrost vrtenja elektromotorja z nastavljanjem ustreznih referenčnih vrednosti frekvenčnemu pretvorniku preko nadzornega (SCADA) sistema. Merili smo od 10 Hz vse do 50 Hz s korakom po 10 Hz. Pri vsakokratnem prehodu z ene na drugo delovno točko smo počakali toliko časa, da so se vrednosti na merilniku pretoka umirile, kar je nakazovalo, da je prehodni pojav v sistemu izzvenel. Šele nato smo sprožili minutni interval merjenja. Različno dušenje in s tem različne potrebe po hladilni vodi v sistemu smo simulirali s pripiranjem ventila na tlačni strani črpalke. Vsak cevovod ima namreč pred in za črpalko vgrajene dušilne ventile (slika 1), ki jih lahko ročno zapiramo in odpiramo. V normalnem obratovanju so ventili vedno popolnoma odprti, za zagotavljanje različnih obratovalnih stanj v sistemu pa smo poleg meritev pri popolnoma odprtem ventilu merili še pri dveh delno odprtih položajih. Ko smo dosegli maksimalno vrtilno hitrost (50 Hz) pri popolnoma, to je 100 % odprtem ventilu, smo na tlačni strani ventil priprli na približno 60 % ter izvajali meritve v obratni smeri nastavljanja frekvence, od 50 Hz do 10 Hz. Potem smo ventil priprli na 30 % odprtosti ter še enkrat izvedli meritve od 10 Hz do 50 Hz.

4 Rezultati meritev

Ker sta pogona EPS1 in EPS2 identična in se izmenoma vključujeta v sistem na tedenski bazi, smo meritve izvedli samo na pogonu EPS2 in izmerjene karakteristike upoštevali kasneje tudi pri analizi obratovalnih stanj pogona EPS1. Oba pogona torej vsebujeta povsem enake gradnike z naslednjimi nazivnimi podatki:

Frekvenčni pretvornik:

$U_n = 380 - 460$ V

$I_n = 61$ A

Črpalka:

$H = 20$ m

$Q = 270$ m³/h

$P_n = 30$ kW

$n = 1460$ min⁻¹

Motor:

$P_n = 30$ kW

$U_n = 400 / 690$ V

$I_n = 56 / 31$ A

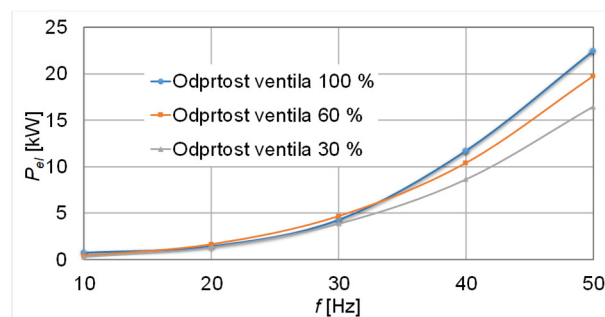
$\cos\varphi = 0,85$

$n = 1465$ min⁻¹

Št. polov: 4

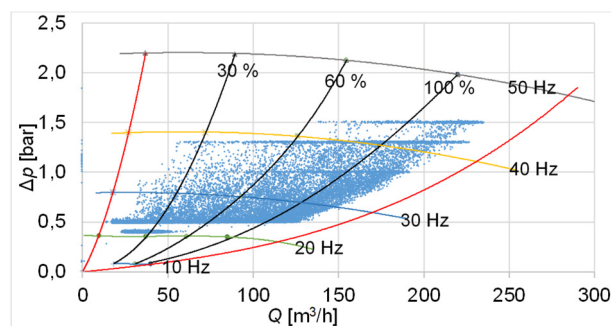
$\eta = 91$ % (IE1)

Na sliki 3 so poteki izmerjene električne moči na vходу EPS2 v odvisnosti od frekvence napajalne napetosti motorja pri vseh treh položajih odprtosti ventila. Opazimo lahko križanje krivulj pri 60 % in 100 %, za kar nimamo eksaktne obrazložitve. Predvidevamo, da je pri popolnoma odprtem ventilu v času meritve na 20 Hz in 30 Hz točki prišlo do zmanjšane odjema hladne vode in s tem do povečanega upora v sistemu, česar zaradi dolgotrajnega postopka izvajanja meritev ni možno izključiti. Deviacija je tako majhna, da je v rezultatih meritev na hidravlični strani niti ni opaziti.



Slika 3. Izmerjena delovna moč na vходу EPS2 v odvisnosti od frekvence napajalne napetosti motorja pri treh odprtostih ventila.

Rezultati meritev tlaka in pretoka na hidravlični strani so prikazani na sliki 4. Krivulje, ki povezujejo točke meritev pri določeni nastavljeni frekvenci, potekajo dokaj vodoravno. Črne krivulje, ki potekajo v vertikalno-diagonalni smeri, pa povezujejo točke meritev, ki so bile izvedene pri posamezni odprtosti ventila. V graf so za potrebe analize dodani še rdeči krivulji in modre točke arhiviranih dejanskih obratovalnih stanj za obdobje enega leta.



Slika 4. Izmerjeni vrednosti količin na hidravlični strani z dodanimi modrimi točkami obratovalnih stanj v enem letu.

5 Ugotavljanje energijskih kazalnikov

Izkoristek celotnega EPS je odvisen od hidravlične moči na izhodu in vhodne električne moči P_{el} . Slednjo imamo

izmerjeno neposredno. Izhodno hidravlično moč P_h izračunamo iz merilnih rezultatov difference tlaka Δp in pretoka Q

$$P_h = \Delta p \cdot Q. \quad (1)$$

Izkoristek sistema η_{EPS} je potem določen z enačbo (2)

$$\eta_{EPS} = \frac{P_h}{P_{el}}. \quad (2)$$

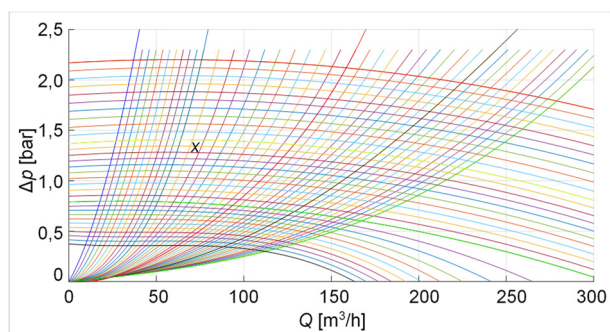
Kumulativno porabo električne energije dobimo z vsoto produktov trenutne moči in časovnega intervala Δt_i

$$W_{el} = \sum_{i=1}^m P_{el} \cdot \Delta t_i. \quad (3)$$

Težava je, da se električne moči posameznih pogonov ne merijo in ni arhiviranih podatkov, torej jo moramo določiti posredno.

Med obratovanjem industrijskega postroja se v deset-minutnih intervalih shranjujejo podatki za tlačni padec v hladilnem sistemu in pretok vode, ter kateri pogon deluje. Hidravlični parametri obratovalnih stanj enega leta so vneseni v graf na sliki 4 (oblak modrih točk). Izkazalo se je, da vseh točk nimamo znotraj območja merjenih parametrov, zato sta z ekstrapolacijo dodani skrajni rdeči krivulji. Sedaj pa je treba matematično opisati lokacijo posamezne obratovalne točke in zanjo določiti potrebno električno moč. V ta namen smo vsak razdelek med krivuljami interpolirali s sto vmesnimi krivuljami, tako vertikalno kot horizontalno. Interpolacijska mreža na sliki 5 je zaradi preglednosti izrisana le z vsako deseto krivuljo. Na podoben način smo z ekstrapolacijo razširili območje moči v odvisnosti od frekvence in razdelke med krivuljami prav tako interpolirali s po sto krivuljami. Sedaj za določeno obratovalno točko x (slika 5) poiščemo najbližje presečišče krivulj in potem najprej določimo, pri kateri frekvenci mora pogon delovati ter nato še s kolikšno močjo. Ta postopek ponavljamo toliko časa, da za vsako izmed obratovalnih točk dobimo potrebno električno moč pogona. Sedaj imamo vse podatke, da poleg hidravlične moči (1) izračunamo tudi, s kakšnim izkoristkom deluje pogon v trenutni delovni točki (2), ter nadalje električno energijo (3) in povprečje moči ter izkoristka za obratovanje skozi celo leto.

Kazalniki učinkovitosti za obravnavana pogona so zbrani v tabeli 1. Poleg že omenjenih povprečnih vrednosti za celotno obratovanje v obdobju enega leta smo v celotnem naboru podatkov poiskali tudi maksimalne vrednosti moči in izkoristka. Pogon pri maksimalni moči ne obratuje z maksimalnim izkoristkom.



Slika 5. Interpolacijska mreža merjenih krivulj za aproksimacijo dejanskih obratovalnih točk.

Tabela 1. Kazalniki učinkovitosti za pogona EPS1 in EPS2

Kazalnik	EPS1	EPS2
η_{EPS} povprečje (%)	34,57	34,62
η_{EPS} maksimum (%)	59,42	60,30
P_{el} povprečje (kW)	3,60	3,38
P_{el} maksimum (kW)	18,97	18,83
P_h povprečje (kW)	1,53	1,42
P_h maksimum (kW)	9,81	9,72
W_{el} (MWh)	92,14	85,16

6 Sklep

V rezultatih analize najbolj izstopata dve dejstvi:

- maksimalni izkoristek pogona okoli 60 % je zelo slab,
- maksimalna električna moč malo pod 19 kW je veliko nižja od nazivne moči motorja 30 kW.

K tako slabemu izkoristku prispeva 2/3 črpalka in 1/3 motor. Z namestitvijo nove črpalke z visokim izkoristkom bi izboljšali izkoristek pogona od 10 % do 15 %. Z zamenjavo obstoječega motorja razreda učinkovitosti IE1 z učinkovitejšim, razreda IE3, bi skupni izkoristek dvignili le za 1,5 %. Lahko trdimo, da bi že sedaj v pogon lahko bil vgrajen motor z nazivno močjo 18,5 kW. Pri novemu pogonu z višjimi izkoristki pa bi imeli še rezervo moči.

Teoretični poskusi, da bi ovrednotili možne prihranke električne energije z upoštevanjem izkoristkov novih motorjev in črpalk, se izjalovijo. Problem je v tem, da tako za motorje, kakor tudi za črpalke ni na voljo funkcijske odvisnosti izkoristka od frekvence. Proizvajalci podajajo le poteke izkoristkov v odvisnosti od obremenitve za frekvenco omrežne napetosti. Da bi lahko izvedli eksaktni izračun, bi morali ponoviti celoten postopek analize, vključno z meritvami na sistemu, z uporabo novega pogona.

Literatura

- [1] Statistični urad Republike Slovenije, Energetska bilanca in energetski kazalniki, <http://pxweb.stat.si>. (30.8.2018)
- [2] M. Pusnik, F. Al-Mansour, B. Sucic, M. Cesen, "Trends and prospects of energy efficiency development in Slovenian industry", *Energy*, vol. 136, pp. 52 – 62, October 2017.
- [3] ZVEI Automation, *Electric Motors and Variable Speed Drives, Standards and legal requirements for the energy efficiency of low-voltage three-phase motors*, Frankfurt, December 2010.
- [4] P. Waide, C. U. Brunner, "Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems", *International Energy Agency*, 2011.
- [5] L. Koprivc, *Magistrsko delo: Analiza energijske učinkovitosti električnih pogonov v procesu hlajenja tehnološke vode*, FE, Ljubljana 2018.