

# Elektroobložna peč, njen vpliv na elektroenergetski sistem in kompenzacija jalove moči v jeklarni 2 v železarni Jesenice

Anton Koselj\*

UDK: 621.365.2:621.3.018  
ASM/SLA: W18s, U7c, 16—61, A5f

## UVOD

Težnja za povečano storilnostjo in zmanjšanjem stroškov je vodila razvoj k novim oblikam in sredstvom za uporabo električne energije. Po drugi strani so se porabniki številčno vedno bolj večali, modernizirali, pa tudi moč posameznih porabnikov je vedno bolj rasla. Tako se vedno bolj pogosto srečujemo z uporabo tiristorjev ter vedno večjim številom in močmi elektroobložnih peči. Raba teh porabnikov pa nosi s seboj negativne povratne vplive na elektroenergetski sistem in jih vsiljuje tudi drugim porabnikom, ki so priključeni na isti elektroenergetski sistem. Valjarniški pogoni, ki so napajani preko velikih tiristorovskih pretvornikov, zlasti pa elektroobložne peči, katerim bo posvečen pretežni del tega članka, povzročajo najmočnejše in najbolj opazne povratne vplive na elektroenergetski sistem.

## RAST PROIZVODNJE ELEKTROJEKLA IN SPREMLJAJOČI POJAVI

V državah, članicah mednarodne zveze za elektrotploto (UIE International Union for Electroheat) (1) ter mednarodne zveze proizvajalcev in distributerjev električne energije (UNIPED — International Union of Producers and Distributors of Electrical Energy) je znašala skupna proizvodnja surovega jekla leta 1952  $271 \cdot 10^6$  t, od tega  $24,6 \cdot 10^6$  t ali 9,1 % elektrojekla.

Leta 1968 se je ta odnos spremenil in je znašala skupna proizvodnja  $516 \cdot 10^6$  t, od tega  $70 \cdot 10^6$  t ali 13 % elektrojekla. V tem obdobju je splošen trend porasta proizvodnje jekla. Evidentno pa je, da v vseh državah raste proizvodnja elektro jekla.

Pretežni del povečanja proizvodnje elektrojekla je doseženo s povečanjem moči proizvodnih agregatov po moči in le manjši del na račun povečanja števila peči. Moči elektroobložnih peči so postale tako velike, da njihovih povratnih vplivov na elektroenergetske sisteme ni bilo mogoče več spregledati. V elektroenergetskih sistemih so se med obratovanjem peči pojavljale tako velike motnje, da so jih čutili porabniki, ki so bili priključeni na isto električno omrežje. Motnje so imele več pojavnih oblik. Te si bomo natančneje ogledali kasneje.

Motnje so postajale vedno bolj pogoste. Analiza tega pojava je pokazala, da je razvoj velikih električnih obložnih peči prehitel razvoj elektroenergetskega sistema. Zaradi tega elektroenergetski sistem ni bil več v stanju zagotoviti obratovanja električnih obložnih peči brez nesprejemljivih spremljajočih motenj ostalih porabnikov v točki skupnega priključka. (Point of Common Coupling — PCC). Vedno bolj je naraščala potreba po informacijah o pretekli praksi in izkušnjah. Tako nastanejo prve nacionalne študije že v petdesetih letih. Leta 1970 je izdalo angleško elektrogospodarstvo znana priporočila P 7/2 (2). To so v bistvu standardi, ki jih je treba upoštevati pri priključevanju novih elektropeči na električno omrežje. Osnovni kriterij teh standardov je, da mora biti 1padeč napetosti v točki skupnega priključka ob kratkem stiku v peči manjši od 2 %. Ta pogoj zagotavlja, da porabniki, ki so priključeni v PCC, ne bodo čutili motenj zaradi obratovanja peči.

Leta 1973 je bila na pobudo UIE in UNIPED izdelana mednarodna študija (1), ki je dala nove ideje in smernice za tehnične in ekonomske poglede na:

- projekt, konstrukcijo in obratovanje elektropeči,
- priključek peči na visokonapetostni sistem,
- uporabo naprav za dušenje motenj.

Pri tej študiji so sodelovali dobavitelji električne energije, uporabniki električnih peči in izdelovalci elektropeči.

Študija je analizirala 187 peči v Evropi in Aziji. Rezultati študije so prikazani v obliki diagrama. Glede na kratkostično moč v PCC in nazivno moč peči je iz diagrama možno razbrati, ali bo peč povzročala motnje v PCC ali ne.

Leta 1976 je angleško elektrogospodarstvo izdalo priporočilo G. 5/3 (3). V njem so definirani standardi višjiharmonskih komponent napetosti in tokov, ki se še smejo pojaviti v omrežju. Popačenje napetostne sinusoida zaradi višjiharmonskih komponent je definirano s faktorjem distorzije FD.

$$FD = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}$$

Skupni FD za 132 kV omrežje po teh priporočilih sme znašati 1,5 %, za posamezne višjiharmonske komponente pa 1 % za lihe in 0,5 % za sode.

\* Železarna Jesenice

\*\* Originalno objavljeno: ŽZB 23 (1989) 1

\*\*\* Rokopis prejet: oktober 1988

## DINAMIKA ELEKTROPEČI V OBRATOVANJU

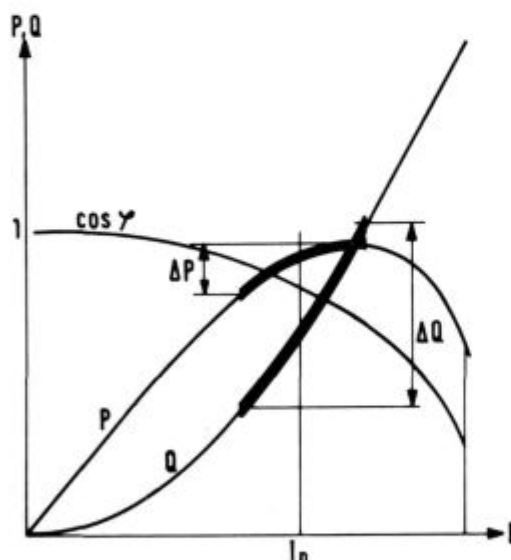
Običajna delovna karakteristika elektroobložne peči je prikazana na sliki 1 (4). Slika 1a pa prikazuje stvarno dinamiko odvzema delovne in jalove moči elektropeči v jeklarni 2 železarne Jesenice med obratovanjem.

Značilen pojav med obratovanjem so trofazni kratki stiki v peči. To se zgodi v primerih, ko elektrode med taljenjem prodrejo že globoko v taljeni vložek in se vložek okrog elektrod zruši na elektrode. Točke a, b, c in d na sliki 1a ponazarjajo take primere. V teh točkah delovna moč pade praktično na nič, jalova pa močno naraste, kajti vrednost jalove moči je  $P_j = 3 \times J^2$ . Grafično se to dobro vidi na sliki 1. V teh primerih običajno kratkostična zaščita peč izklopi.

V normalni delovni točki med taljenjem, to je pri  $\cos \varphi$  okrog 0,7, bo nihanje toka zaradi nestabilnosti tokovnega loka imelo za posledico veliko nihanje jalove moči, ki jo rabi peč. Dejansko je nihanje jalove moči mnogo večje kot delovne. Nihanje jalove moči lahko pojasnimo na sliki 2. To je enopolna shema električne peči, ki je priključena na električno omrežje v točki skupnega priključka z drugimi porabniki električne energije.

Na sliki 2 je prikazan opis s kazalčnim diagramom. Iz tega se da s pomočjo trigonometričnih funkcij izračunati padec napetosti na kritičnih zbiralkah, ko peč potegne tok obremenitve.

$$\Delta U = I X_n \sin \varphi + I R_n \cos \varphi = I X_n \left( \sin \varphi + \frac{R_n}{X_n} \cos \varphi \right) \quad (1)$$



Slika 1.

Obremenilni diagram elektroobložne peči

I	— Tok v elektrodi	$\Delta Q$	— Nihanje jalove moči
P	— Delovna moč	$\cos \varphi$	— Faktor delavnosti
Q	— Jalova moč	$I_n$	— Tok v delovni točki
$\Delta P$	— Nihanje delovne moči		

Fig. 1

Load diagram of electric arc furnace

I	— current in electrode	$\Delta Q$	— fluctuation of reactive power
P	— active power	$\cos \varphi$	— power factor
Q	— reactive power	$I_n$	— load current
$\Delta P$	— fluctuation of active power		

V normalnem električnem omrežju je reaktanca  $X_n$  mnogo večja od upornosti  $R_n$ , to je  $R_n \ll X_n$ . Zato drugi člen v enačbi 1 lahko zanemarimo in pišemo

$$\frac{\Delta U}{\sqrt{3}} = I X_n \sin \varphi \quad (2)$$

Nadalje reaktanco omrežja lahko izrazimo kot

$$X_n = \frac{U_0^2}{S_k} \quad (3)$$

Jalovo moč, ki jo zahteva peč, lahko napišemo

$$Q = I U_0 \sqrt{3} \sin \varphi \quad (4)$$

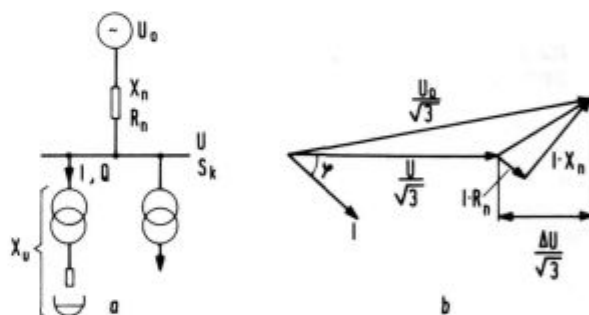
Če nesemo enačbi 2 in 3 v enačbo 4, dobimo

$$\frac{\Delta U}{U_0} \approx \frac{Q}{S_k} \quad (5)$$

Posebni primer padca napetosti, ki se pojavi med praznim tekom peči in trifaznim kratkim stikom med konicami elektrod, lahko zapišemo

$$\frac{\Delta U}{U_0} \approx \frac{Q \max}{S_k} = \frac{X_n}{X_n + X_u} \quad (6)$$

Nekaj splošno ugotovljenih pravil nam lahko pomaga oceniti, ali bodo porabniki električne energije, ki so priključeni na kritične zbiranke v PCC, zaradi priključitve električne peči moteni ali ne.



Slika 2.

Enopolna shema in kazalčni diagram električne mreže z obremenilnim tokom elektro peči

a: Enopolna shema	b: Kazalčni diagram
I — Tok elektrode	$\Delta U$ — Padec napetosti v PCC
Q — Jalova moč peči	$U_0$ — Napetost praznega teka el. mreže
$R_n$ — Upornost el. mreže	$X_n$ — Reaktanca el. mreže
$S_k$ — Kratkostična moč v PCC	$X_u$ — Reaktanca peči
U — Napetost v PCC	$\varphi$ — Fazni kot

Fig. 2

Single-pole scheme and vector diagram of electric network with load current of electric arc furnace

a: single-pole scheme	b: vector diagram
I — electrode current	$\Delta U$ — voltage drop in PCC
Q — reactive power of furnace	$U_0$ — voltage of network stand-by
$R_n$ — network resistance	$X_n$ — network reactance
$S_k$ — short-circuit power in PCC	$X_u$ — furnace reactance
U — voltage in PCC	$\varphi$ — phase angle

Glede na ugotovitve študije UIE in UNIPEDE, ki je raziskovala motenje domačih porabnikov na področjih elektroobložnih peči, ni pričakovati motenj oziroma pritožb zaradi flickerjev, če relativni padec napetosti, izračunan po enačbi 6 ne preseže 1,8 % (4). Motnje oziroma pritožbe se bodo verjetno pojavile, če bo ta napetost presegla 2,0 %.

Maksimalna jalova moč, ki jo potegne peč med trifaznim kratkim stikom v peči, je približno enaka

$$Q_{max} \approx \sqrt{2} S \quad (7)$$

pri čemer je S maksimalna navidezna moč peči. Iz zgoraj omenjenega pravila

$$\frac{\Delta U}{U} < 1,8 \% \text{ sledi}$$

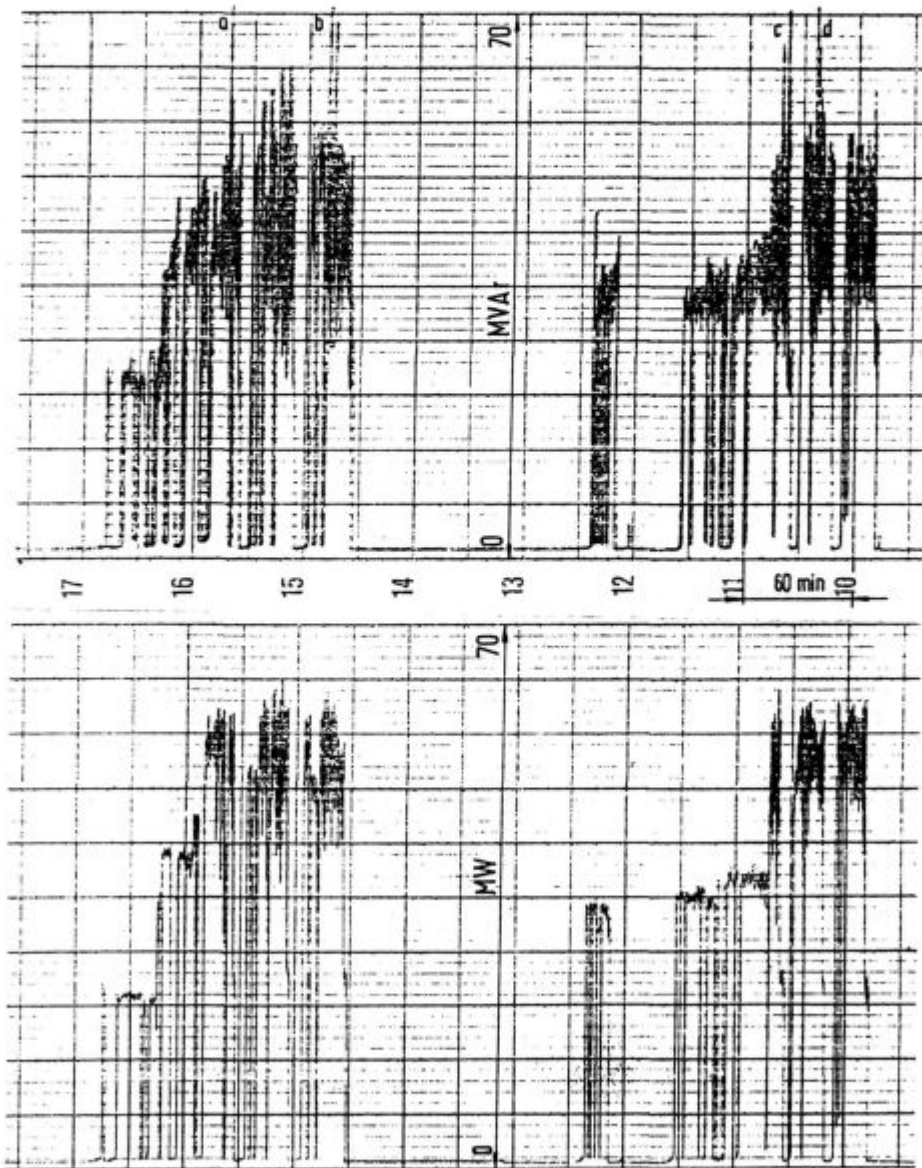
$$\frac{Q_{max}}{S_k} \approx \frac{\sqrt{2} S}{S_k} = 0,018$$

ali

$$S_k \frac{\sqrt{2} \cdot S}{0,018} = 79 S$$

Z besedami to pravilo pravi: Da bi se izognili opisanim pojavnim oblikam motenj na zbiralnicah v PPC, mora kratkostična moč na teh zbiralnicah doseči vrednost 79-kratne maksimalne navidezne moči peči. To pa so vrednosti, ki jih mnogokrat ni možno doseči.

Kadar je iz navedenih pravil možno sklepati na to, da bo peč povzročala motnje v omrežju, je iz enačbe 6 mo-



Slika 1a.

Diagram odvzema delovne in jalove moči

Fig. 1a

Load diagram of active and reactive power

žno sklepati o naslednjih ukrepih za izboljšanje stanja v mreži:

— Povečati je treba reaktanco peči  $X_w$ . S tem se zmanjša jalova moč, ki jo zahteva peč. Za dano peč to seveda pomeni ekvivalentno zmanjšanje delovne moči. V primerih zelo mehke mreže se ta ukrep pogosto izvaja s tem, da se pred pečni transformator vgradi dušilka. Ta se v času taljenja vklopi, v času rafinacije pa izklopi.

— Reaktanco napajalnega visokonapetostnega omrežja je treba zmanjšati s tem, da se ojača električno omrežje. S tem se poveča kratkostična moč  $S_k$ . Jačanje napajalnega omrežja je seveda tudi zelo drago. Vendar se tudi to v določenih primerih izvaja, če družbenoekonomski interes to opravičuje.

— Nihanje jalove energije, ki jo peč vleče iz omrežja, je možno zmanjšati s tem, da se ob peči zgradi naprava za kompenzacijo jalove energije.

### Pojavne oblike motenj, ki jih povzročata obratovanje elektropeči

Elektropeč je po svoji naravi zelo nemiren, dinamičen porabnik električne energije. Prav zaradi svoje dinamike povzroča neprijetno povratno delovanje na elektroenergetski sistem, na katerega je priključena. Razlikujemo naslednje pojave povratnega delovanja:

#### Poslabšanje $\cos\varphi$

Sekundarni tokokrog od niskonapetostnih spenk pečnega transformatorja do konic elektrod predstavlja 75 % do 85 % celotne reaktance od PCC do konic elektrod (6). Peč je zaradi tega velik porabnik jalove energije. Jalova moč v primerjavi s čisto delovno močjo povzroča dodatne izgube v proizvodnih agregatih in prenosnih napravah. Slab  $\cos\varphi$  pa ni sprejemljiv tudi za elektrogospodarstvo, ki zahteva, da je  $\cos\varphi \geq 0,95$ .

#### Sprememba napetosti zaradi jalove moči

Zelo pomembno je povratno delovanje jalove moči glede na njeno velikost in hitrost spreminjanja. V nasprotju z delovno močjo, deluje jalova moč v celoti na spremembo napetosti napajalnega omrežja. Impedanco napajalnega omrežja predstavlja pretežno reaktanca. Zato je padec napetosti  $\Delta U$  sorazmeren prenašani jalovi moči  $\Delta Q$ , kot smo ugotovili že v enačbi 5.

$$\Delta U = U \frac{Q}{S_k}$$

Padec napetosti povzroča neprijetne posledice za lastne in zunanje porabnike, ki so priključeni na isto električno omrežje. Izraža se v naslednji obliki:

- moč motorjev pada linearno z napetostjo
- izgube bakra v motorjih in razdelilnih napravah pri nespremenjeni moči rastejo kvadratno s padcem napetosti
- moč elektropeči in drugih termičnih porabnikov pada kvadratno z napetostjo.

#### Flickerji

Flickerji so za ljudi moteča svetlobna migotanja. Najbolj se opazijo na svetlobnih telesih z žarilno nitko. Povzročajo pa jih nihanje napetosti v frekvenčnem področju približno 0 do 30 Hz. Taka napetostna nihanja se poja-

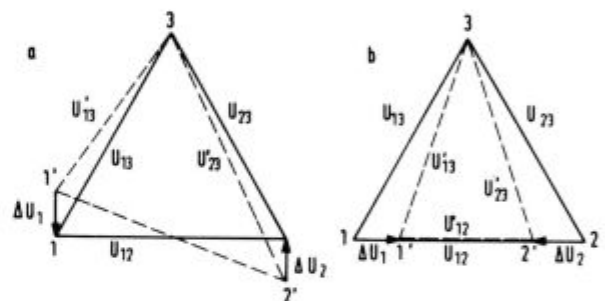
vljajo zaradi nihanja jalove moči v glavnem zaradi neenačmernega in nekontroliranega tokovnega loka v pečeh. Ta so najbolj izrazita v fazi topljenja.

Za meritve in oceno flickerjev obstajajo nacionalna in mednarodna priporočila. Za mednarodno priznani instrument za meritve flickerjev je specifikacijo izdelal tudi komite za povratne vplive na električno omrežje pri UIE.

### Nesimetrična obremenitev mreže

Nesimetrična, to je neenaka obremenitev treh faz nastane zaradi enofaznih porabnikov ali popolnoma nekontroliranih različnih impedanc trofaznih elektroobložnih peči. Nesimetrija v obremenitvi povzroči različne padce napetosti na reaktancah električnega omrežja in s tem neenake medfazne napetosti na mreži.

Enofazna delovna moč le ne bistveno spremeni vrednost medfazne napetosti v obremenjeni fazi. Vpliva pa na zmanjšanje oziroma povečanje ostalih dveh medfaznih napetosti — **slika 3a**. Nasprotno pa je posledica enofazne jalove obremenitve bistveno povečan padec napetosti v obremenjeni fazi in majhen padec napetosti v ostalih dveh medfaznih napetostih — **slika 3b**.



**Slika 3.**

Nesimetrična obremenitev el. mreže

- a: Vpliv obremenitve z delovno močjo na medfazno napetost  $U_{12}$  el. mreže  
 b: Vpliv obremenitve z jalovo močjo na medfazno napetost  $U_{12}$  el. mreže

**Fig. 3**

Asymmetric load of electric network

- a: influence of load with active power on the network line voltage  $U_{12}$   
 b: influence of load with reactive power on the network line voltage  $U_{12}$

Nesimetrično obremenitev je treba simetrirati tako, da se v referenčni točki spet vzpostavi enakostraničen napetostni trikotnik.

### Višje harmonski tokovi (7)

Obstaja cela vrsta porabnikov, ki so izvor visokofrekvenčnih tokov. Ti povzročajo na reaktancah napajalnih električnih omrežij padce napetosti in razcefrajo sinusno obliko mrežne napetosti. Višje harmonski tokovi povzročajo poleg tega še dodatne izgube na elektroenergetskih napravah. Visoko harmonske komponente lahko motijo občutljive elektronske in telekomunikacijske naprave.

Nacionalna in mednarodna priporočila zaradi škodljivih vplivov postavljajo meje višjim harmonskim komponentam, ki se smejo pošiljati v omrežje.

Elektropeči proizvajajo ves zvezni spekter višjih harmonskih tokov. V njem so najbolj izrazite lihe in sode višje harmonske komponente. Med njimi se pojavljajo tudi podharmonske. Amplitude višje harmonskih komponent v povprečju padajo približno s

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \quad (5)$$

Za višje harmonski spekter so odgovorni nestabilni obratovalni odnosi treh obločnih lokov in nelinearna U-I karakteristika. Od vseh povratnih vplivov na elektroenergetski sistem je najtežje obvladovati prav višje harmonske tokove in napetosti, kajti njih izvori se med obratovanjem spreminjajo in prav tako impedance oziroma kratkostične moči elektroenergetskega sistema. Tej dinamiki pa tudi kompenzacijska naprava ne more v celoti slediti.

### KOMPENZACIJA JALOVE MOČI V ŽELEZARNI JESENICE

Železarna Jesenice po svojem geoelektričnem položaju leži na koncu 110 kV kraka, kar pomeni, da je napajana enostransko. Dve elektro-peči s pečnimi transformatorji po 18,75 MVA (LM) in 18 MVA (ASEA) sta bili do izgradnje jeklarne 2 napajani po enem 110 kV daljnovodu iz 60 km oddaljene RTP Kleče pri Ljubljani. 110 kV zbiralnica v Klečah so bile skupna točka peči in ostalih porabnikov v Ljubljani in na Gorenjskem. Kadar sta obratovali obe peči hkrati v fazi taljenja, so v večernih urah njuno delovanje čutili vsi porabniki razsvetljave z žarnicami na žarilno nitko. Luči so močno utripale, v Ljubljani in na Gorenjskem. Na ta račun je bilo slišati nemalo pritožb.

Ko smo v sedemdesetih letih na Jesenicah pričeli razmišljati o gradnji nove jeklarne 2 z UHP pečjo s transformatorjem 60 MVA, elektrogospodarstvo Slovenije prav zaradi motenj, ki jih bo taka peč povzročala na elektroenergetskem sistemu, o njenem priključku ni hotelo nič slišati. Zahtevalo je predhodno izdelavo študije, ki naj bi pokazala vse vplive in motnje, ki jih bo peč povzročala

na elektroenergetskem sistemu, ter ukrepe, ki jih je treba izvesti, da se motnje preprečijo.

Študija (8) je pokazala, da je za priključitev jeklarne 2 na elektroenergetski sistem Slovenije treba predhodno izvesti naslednje ukrepe:

- V 25 km oddaljenem Okroglo (Kranj) je treba zgraditi novo transformatorsko postajo 400/110 kV.
- Točka skupnega priključka jeklarne 2 in drugih porabnikov je na 110 kV zbiralkah v RTP Okroglo 400/110 kV.
- Od 110 kV zbiralk v RTP Okroglo do 25 km oddaljene jeklarne 2 je treba zgraditi dvosistemski 110 kV daljnovod, ki bo napajal vse sunkovite porabnike v Železarni, to je elektropeči v jeklarni 1 in jeklarni 2.
- V jeklarni 2 je treba zgraditi dinamično napravo za kompenzacijo jalove moči.

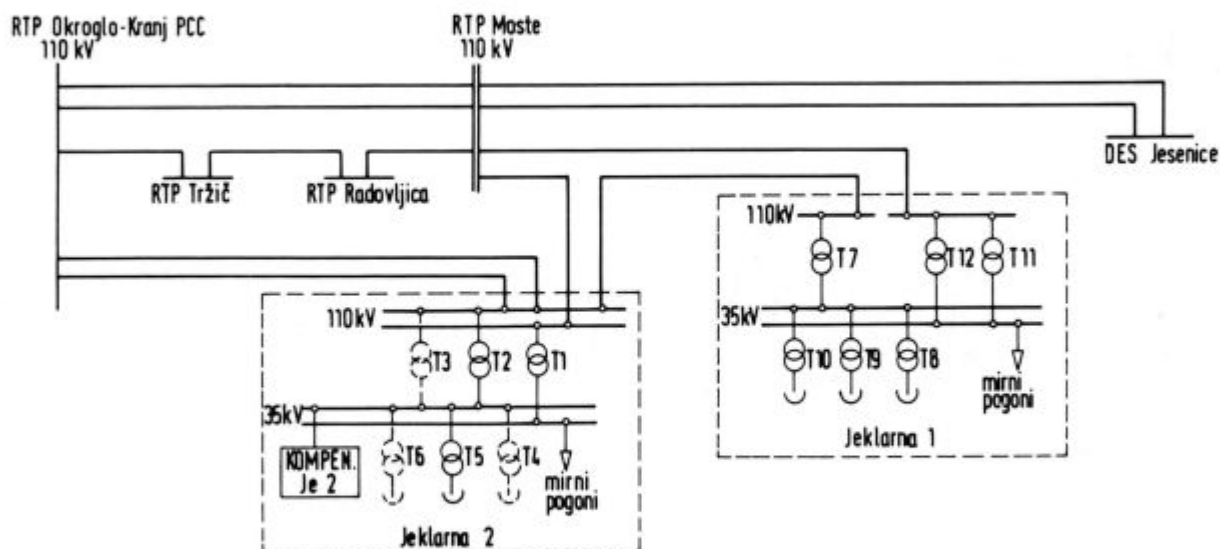
Pred začetkom obratovanja jeklarne 2 so bili vsi ti objekti zgrajeni (slika 4).

RTP Okroglo 400/110 kV je gradilo elektrogospodarstvo Slovenije s finančno soudeležbo železarne Jesenice. V njej je vgrajen transformator 300 MVA, 400/110 kV. S tem smo dosegli na 110 kV zbiralkah v RTP Okroglo kratkostično moč v višini 3600 MVA. Ta kratkostična moč je bistveno prispevala k zmanjšanju motenj elektropeči v elektroenergetskem sistemu.

Peč v času taljenja vleče jalovo moč v višini okrog 60 MVAR; v konicah, ko nastajajo v peči kratki stiki, pa tudi 70 MVAR in več. Tedaj se pojavljajo padci napetosti v RTP Okroglo.

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{Q}{S_x} = \frac{70}{3600} \text{ 0,0194 ali 1,94 \%}$$

Pri nekoliko večjem nihanju jalove moči ali pri nekoliko zmanjšani kratkostični moči zaradi trenutnega obratovalnega stanja daljnovodov (9) in proizvodnih agregatov, padec napetosti oziroma nihanje napetosti lahko doseže vrednosti znatno preko 2 %. To pa so tiste vrednosti, ki v elektroenergetskem sistemu povzročajo nesprijemljive motnje za vse potrošnike, ki so priključeni v



Slika 4. 110 kV sistem daljnovodov za napajanje jeklarne 1 in jeklarne 2

Fig. 4 110 kV supply network for steel plants 1 and 2

PCC. Iz tega sledi, da je bila izgradnja RTP Okroglo 400/110 kV potreben, vendar ne zadosten ukrep, da bi preprečili povratno delovanje elektropeči v jeklarni 2 na ostale porabnike električne energije.

Dvosistemski daljnovod  $2 \times 110$  kV med PCC (RTP Okroglo) in jeklarno 2 predstavlja zmanjšanje impedance na tej relaciji. To pa predstavlja ugodnejše pogoje za obratovanje jeklarne 2 in jeklarne 1.

Nadaljnji ukrep za zmanjšanje povratnih vplivov na elektroenergetski sistem je kompenzacija jalove moči. V železarni Jesenice smo zgradili dva sistema za kompenzacijo jalove moči. Prvega, statičnega, smo zgradili na 5 kV napetostnem nivoju za kompenzacijo vseh pomožnih porabnikov na 0,4 kV. Ta sistem sestoji iz treh grup po 2,5 MVA. Vsako grupo samostojno in neodvisno vklaplamo in izklaplamo glede na porabo jalove moči. Ta sistem je v celoti projektiral in izvedel IMP Ljubljana. Sistem je enostaven in uspešno opravlja svojo funkcijo.

Drugi, dinamični kompenzacijski sistem smo zgradili na 35 kV napetostnem nivoju. Po prvi fazi izgradnje jeklarne 2 služi za kompenzacijo jalove moči, ki jo zahteva 85 t elektroobločna peč s transformatorjem 60 MVA. Naprava je dimenzionirana in zgrajena za končno fazo izgradnje jeklarne 2, ko bo zgrajena še ena elektroobločna peč s transformatorjem 48 MVA in ena ponovčna peč s

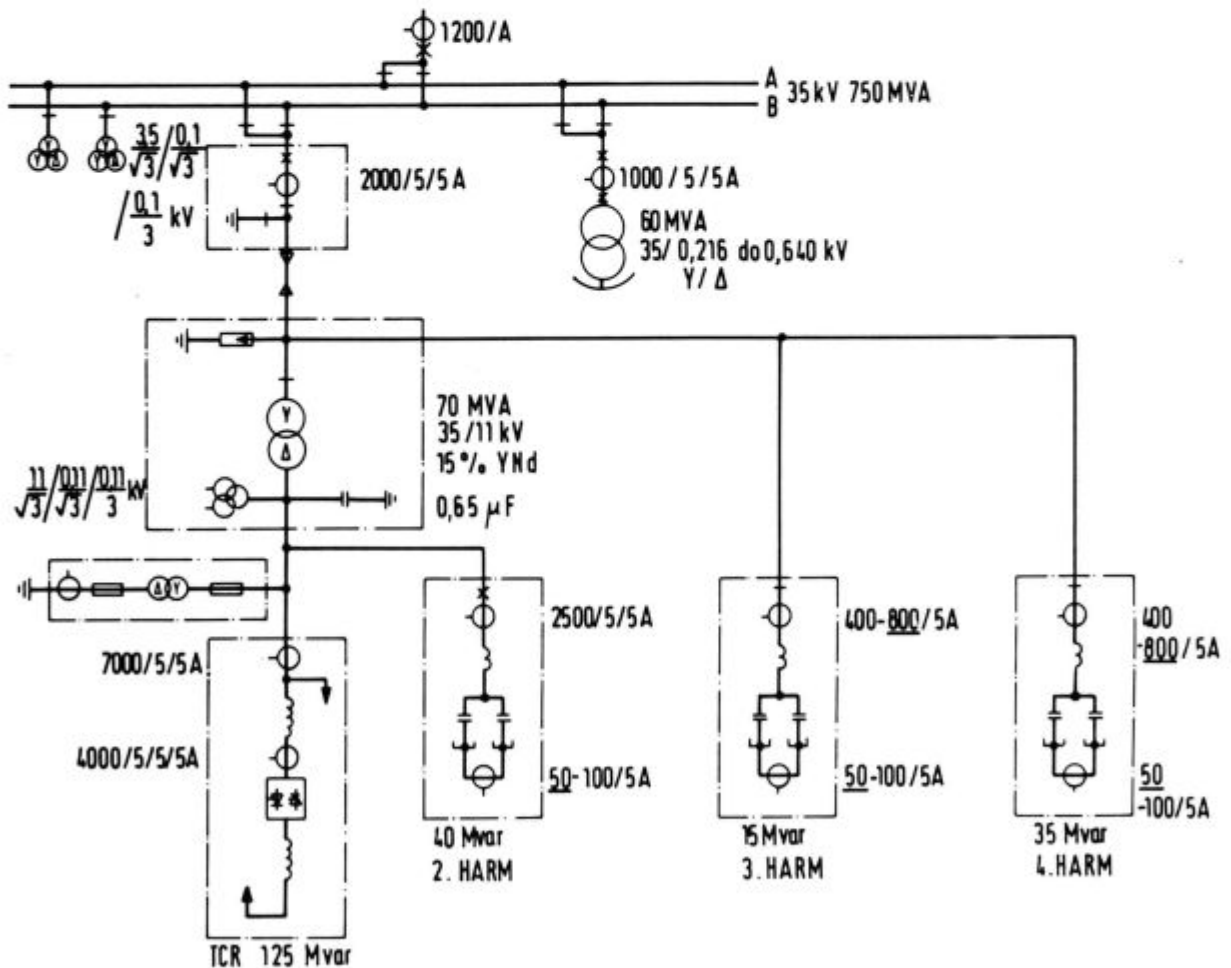
transformatorjem 12 MVA. Kapaciteta zgrajene kompenzacijske naprave je 90 MVar kapacitivno in 125 MVar induktivno. To pomeni, da pri popolnoma zaprtih tiristorjih, ki krmilijo dinamiko kompenzacije, lahko kompenziramo 90 MVar induktivne moči. Pri maksimalno odprtih tiristorjih pa kompenzacijska naprava predstavlja za električno mrežo induktivno breme moči 35 MVar.

Glede na to, da elektroobločne peči proizvajajo tudi mnogo visoko harmonskih tokov, je celotna kapacitivna moč razdeljena na tri višje harmonske tokokroge, ki so uglašeni za 2., 3. in 4. harmonsko. Njihovi deleži moči so razvidni s *slike 5*.

Celotno kompenzacijsko napravo je dobavila švedska firma ASEA, razen kondenzatorjev, ki jih je dobavila ISKRA Semič.

Elektrogospodarstvo Slovenije je ob izdaji elektroenergetskega soglasja zahtevalo, da bodo ob začetku obratovanja jeklarne 2 izpolnjeni naslednji pogoji:

- $\cos \varphi$  mora biti enako ali večji od 0,95
- skupni faktor distorzije v napetosti ne sme biti večji od 3 %
- faktor distorzije posameznih višjih harmonskih komponent v napetosti ne sme biti večji kot 1 %



**Slika 5.**  
Enopolna shema 35 kV dinamične kompenzacije v jeklarni 2

**Fig. 5**

One line diagram of 35 kV dynamic compensation in steel plant 2

— amplitude napetostnih motenj, katerih frekvence so manjše od 16 Hz, ne smejo presegati 2 % amplitude osnovne harmonske komponente v napetosti.

Ti pogoji so v skladu s tehničnimi normami in standardi, ki se danes v splošnem uporabljajo v svetu, kadar imajo opraviti s podobnim porabnikom, kot je jeklarne 2. To je bil tudi prvi primer v Jugoslaviji, ko so bile postavljene pred uporabnike tako ostre zahteve za izpolnjevanje pogojev, ki bodo preprečili onesnaževanje elektroenergetskega sistema.

Vsi kriteriji elektroenergetskega soglasja so bili po stavitvi jeklarne 2 v obratovanje verificirani z meritvami (10), ki jih je izvedlo elektrogospodarstvo Slovenije s sodelovanjem elektroinštituta »Milan Vidmar« Ljubljana, predstavnikov ASEA in železarne Jesenice. Meritve so bile izvršene v točki skupnega priključka RTP Okroglo 400/110 kV.

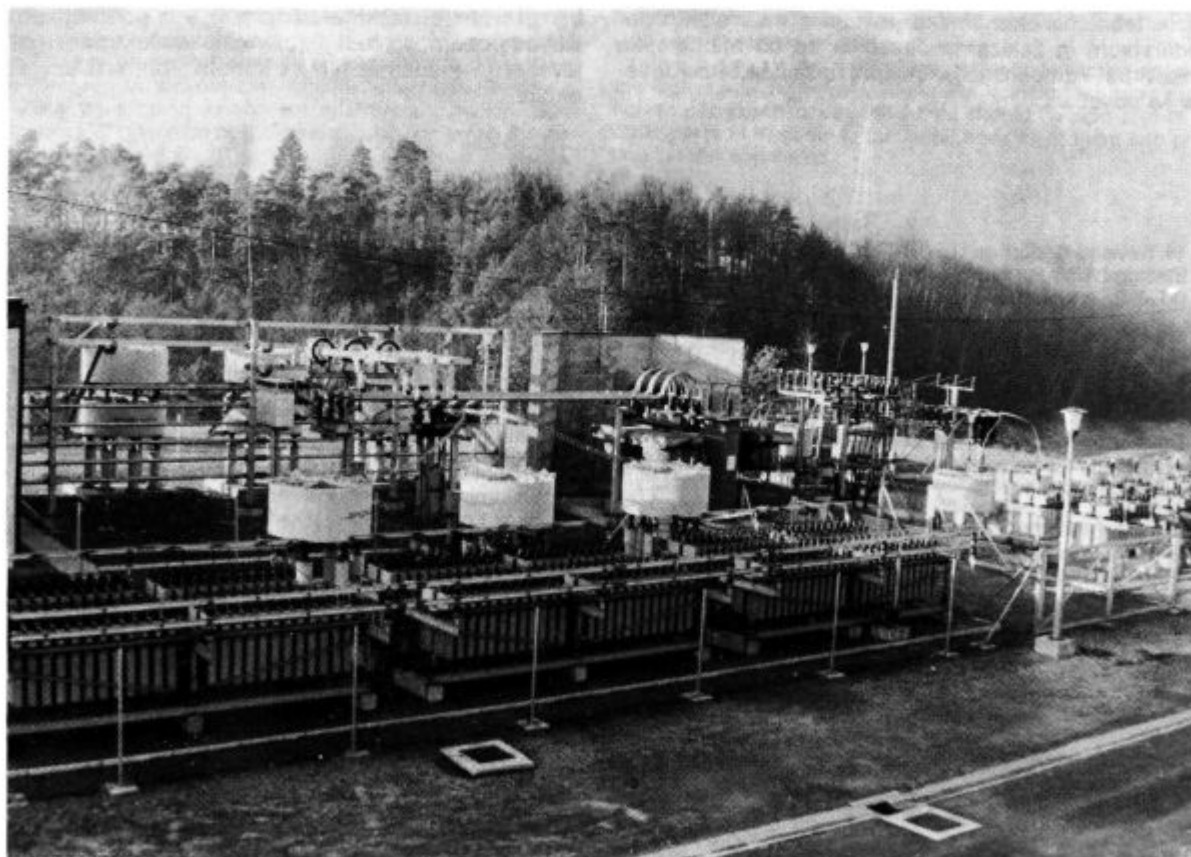
Kompenzacijska naprava se je v obratovanju pokazala kot izredno kvaliteten in učinkovit stabilizator napetosti, ki lahko sledi dinamiki obratovanja peči. Meritve kažejo, da nam ob vklopljeni kompenzaciji napetost praznega teka v višini 35,8 kV ob vklopu peči na polno moč pade na 35 kV, to je za 2,2 %.

Če pa kompenzacijo izklopimo, nam napetost pade na 31 kV ali za 13,4 %. Če upoštevamo, da moč peči pada s kvadratom napetosti, lahko ugotovimo, da pri izklopljeni kompenzaciji peč lahko obratuje samo s 75 % svoje nominalne moči. To pa pomeni, da se časi taljenja

temu ustrezno podaljšajo. Ob izklopljeni kompenzacijski napravi se v fazi taljenja v PCC v RTP Okroglo pojavijo povratni vplivi peči v vseh pojavnih oblikah. Na svetlobnih telesih je nihanje napetosti možno opaziti s prostim očesom,  $\cos\varphi$  pade na manj kot 0,7, poveča se nesimetrična obremenitev po fazah, prisotnost višje harmonskih komponent pa popači napetostno sinusoido preko dopustnih meja. Ob izklopljeni kompenzaciji zato peč sme obratovati samo s približno 65 % nominalne moči. Zaradi vseh navedenih argumentov si brez kompenzacijske naprave ne moremo zamišljati optimalnega obratovanja jeklarne 2, pa tudi izvedljivo ni (slika 6).

Važno vlogo je v fazi projektiranja in puščanja v obratovanje imela ASEA kot dobavitelj in nosilec celotnega projekta. Strokovnjaki ASEA so morali upoštevati in realizirati vse zahteve elektroenergetskega soglasja in zahteve železarne Jesenice, da vključi v projekt tudi domače dobavitelje opreme. ASEA ima na področju kompenzacije jalove moči najbolj bogate izkušnje (11). Zato jim je bilo možno zaupati ta izredno zahtevni projekt. Nekatere realizirane projekte v obratovanju nam je ASEA pokazala na Švedskem. Le-ti so nas prepričali o pravilnosti naše odločitve, da kompenzacijsko napravo dobavi ASEA.

Zelo pomembna je tudi ekonomska kategorija kompenzacije jalove moči. Zaradi stabilnosti napetosti, ki jo zagotavlja kompenzacijska naprava, je zagotovljena optimalna storilnost peči in zmanjšanje vseh vrst izgub (to-



Slika 6.

35 kV naprava za kompenzacijo jalove energije

Fig. 6

35 kV set-up for reactive power compensation

plotnih in električnih) na minimum. Zaradi učinkovite stabilizacije napetosti in njenih pozitivnih učinkov se gradijo kompenzacijske naprave tudi za stabilizacijo napetosti pri velikih valjavniških pogonih in za krmiljenje napetosti prenosnih omrežij (11).

Druga komponenta ekonomske kategorije je strošek za jalovo energijo. Za proizvodnjo ene tone jekla se porabi povprečno 500 kVAhr. Pri letni proizvodnji jekla 210 000 t znaša poraba jalove energije 105 000 000 kVAhr. Pri povprečni ceni jalove energije 28 din/kVAhr, ki trenutno velja, znaša letni strošek jalove energije 2 940 000 000 din. To pa je dejansko vsakoletni prihranek, ki ga ni treba plačati za nabavo jalove energije. Z njim se bo kompenzacijska naprava odplačala v nekaj letih. Ves nadaljnji prihranek pa bo predstavljal dobiček.

Že spredaj smo omenili, da je kompenzacijska naprava zgrajena za končno fazo jeklarne 2. Od 90 MVAR kapacitivne moči trenutno potrebujemo približno 60 MVAR. Tako nam ostaja 30 MVAR neizkoriščenih.

Po drugi strani pa elektroenergetskemu sistemu Slovenije večkrat primanjkuje jalove energije. To bi bilo možno dobiti iz kompenzacijske naprave jeklarne 2. V ta namen bo treba nekoliko dopolniti krmilje, ki bo nato omogočalo oddajanje poljubne jalove moči v elektroenergetski sistem Slovenije. Z elektrogospodarstvom Slovenije smo se načelno že dogovorili za tako sodelovanje. Z dobaviteljem kompenzacijske naprave pa se železarna Jesenice dogovarja o tehničnih možnostih in rešitvah za oddajanje jalove energije v elektroenergetski sistem. Zaradi te tehnično ekonomske povezave med elektrogospodarstvom in železarno Jesenice se bo ekonomska učinkovitost kompenzacijske naprave za železarno Jesenice še povečala.

## ZAKLJUČEK

Na področju pridobivanja jekla v elektroobložnih pečeh se v Jugoslaviji srečujemo z enakimi problemi, kot so jih imeli tisti, ki so to tehnologijo osvajali pred nami. Naša prednost je v tem, da lahko izkoriščamo njihove izkušnje. Ko se odločimo za gradnjo novega porabnika električne energije, je treba uporabiti njihove izkušnje in standarde ter upoštevati specifičnosti novega projekta.

Na Jesenicah smo bili pod udarom javne kritike že zaradi motenj, ki smo jih vnašali občasno s starimi elektro pečmi. Zato smo bili pred izgradnjo jeklarne 2 prisiljeni izvesti študijo in analizo posledic, ki jih bo povzročila v elektroenergetskem sistemu jeklarne 2 in predvideti ukrepe, ki bi pojav negativnih vplivov preprečili. Rezultate študije smo upoštevali in v projektu tudi izvedli. Po stavitvi jeklarne 2 v obratovanje se je izkazalo, da smo ukrepali pravilno.

Ojačitev elektroenergetskega sistema Gorenjske in izgradnja kompenzacijske naprave tvorita tehnološko celoto, ki omogoča nemoteno in učinkovito izkoriščanje elektropeči v jeklarni 2 brez negativnih povratnih vplivov na elektroenergetski sistem. S tem pa je bil glavni cilj obeh investicij dosežen.

Dosegli smo še več. Z ekonomskega stališča bo kompenzacijska naprava postala v nekaj letih za železarno Jesenice vir dohodka. Z izpolnitvijo njenega krmilja pa bo možno še tesnejše sodelovanje z Elektrogospodarstvom Slovenije pri reševanju obojestranskih problemov.

S tem projektom na področju kompenzacije jalove energije v Jugoslaviji orjemo ledino. Mnenja smo, da bi bilo prav, ko bi našim izkušnjam na tem področju posvetili več pozornosti tudi jugoslovanska elektroenergetska javnost in industrija ter jih koristno prenašala v svoje okolje.

## LITERATURA

1. 14. Revised Report on UIE/UNIPED Enquiry the Effects of Electric Arc Furnaces on Power Systems, A.I.M. — C.B.E.E., November 1973
2. Engineering Recommendation P7/2, Fiftieth Chief Engineers Conference, July 1970, Classification «C», The Electricity Council, Supply to Arc Furnaces
3. Engineering Recommendation G5/3, System Design and Development Committee, September 1976, Classification «C», Limits for Harmonics in the United Kingdom Electricity Supply System
4. Thyristor switched capacitors for reactive power compensation, Tom Sjøkvist, ASEA, Västerås, Sweden, Reprinted from Iron and Steel Engineer
5. Kompensationsanlage für die Industrie, Ernst Wanner, Roger Mathys und Dr. Michael Häusler, Baden, Druckschrift Nr. CH-IT 123090 D
6. Large Arc Furnace Instalation, Problems with Flicker, and Effect on Utility Distribution Systems, by A. R. Oltrogge, General Electric Company, Schenectady, New York
7. Harmonics, characteristic parameters, methods of study, estimates of existing values in the network, by Working Group 36.05 (Disturbing Loads/, Electra No. 77)
8. Branko Fatur, Krešimir Bakič: Raziskava vključitve elektroobložnih peči na Jesenicah v omrežje, Ref. št. 796, 1980, Elektroinštitut «Milan Vidmar»
9. Rupnik Anton s sodelavci: Analiza kratkostičnih razmer v VN omrežju Slovenije, del II, Referat št. 953/II, junij 1987, Elektroinštitut «Milan Vidmar» Ljubljana
10. Skok Kostja, Kratina Dankan: Poročilo o meritvah vpliva Železarne Jesenice na elektroenergetski sistem, SOZD EGS — Sektor eksploatacije, Služba za meritve
11. Static VAR Compensators Series Capacitors, Reference List, ASEA Transmission, Reklam Center, Västerås, Printed in Sweden, VLT-PRESS, 1987. 11 2000, Phamphlet Nr 47-125 E



## ZUSAMMENFASSUNG

Auf dem Gebiet der Stahlgewinnung in Elektrolichtbogenöfen stoßen wir auf dieselben Probleme wie diejenigen, die diese Technologie schon vor uns eingeführt haben. Unser Vorteil ist in dem, dass wir ihre Erfahrungen nutzen können. Nachdem man sich für den Bau eines neuen Benutzers elektrischer Energie entschlossen hat, sind diese Erfahrungen und die Standards zu nutzen, und die Besonderheiten des neuen Projektes zu berücksichtigen.

In Jesenice waren wir unter dem Druck der öffentlichen Kritik schon wegen der Störungen die wir zeitweise mit den alten Öfen verursacht haben. Aus diesem Grunde waren wir vor dem Bau von Stahlwerk 2 gezwungen eine Studie und Analyse der Nachwirkungen die durch das Stahlwerk 2 im Elektroenergetischen System verursacht werden durchzuführen und die Vorkehrungen vorzusehen, welche die Erscheinung negativer Einflüsse verhindern würden. Die Ergebnisse dieser Studie sind im Projekt berücksichtigt und auch durchgeführt worden. Nach der Inbetriebnahme von Stahlwerk 2 hat sich gezeigt, dass wir richtig gehandelt haben.

Die Verstärkung des elektroenergetischen Systemes in Gorenjska und der Ausbau der Kompensationsanlage bilden eine technologische Einheit, welche ein störungsfreies und wirkungsvolles betreiben des Lichtbogen — Schmelzofens im Stahlwerk 2 ohne negativer Rückwirkungen auf das elektroenergetische System möglich macht. Damit war das Hauptziel beider Investitionen erreicht.

Noch mehr haben wir erzieht. Aus wirtschaftlichem Standpunkt gesehen wird die Kompensationsanlage in einigen Jahren für das Hüttenwerk Jesenice eine Einkommensquelle. Durch die Vervollständigung der Regelung wird eine noch engere Zusammenarbeit mit der Elektrowirtschaft von Slowenien bei der Lösung beidseitiger Probleme möglich.

Mit diesem Projekt der Kompensation der Blindleistung aktern wir das Brachland in Jugoslawien. Es wäre richtig, wenn unseren Erfahrungen auf diesem Gebiet mehr Acht auch die jugoslawische elektroenergetische Öffentlichkeit und Industrie würden würde und sie in ihre Umgebung nützlich übertragen würde.

## SUMMARY

Steelmaking in electric arc furnaces in Yugoslavia creates the same problems which had to be solved by those who mastered this technology before us. Our advantage is in the fact that we can make use of their experiences. When a decision is made to erect a new consumer of electric energy, these experiences and standards must be applied, and simultaneously the peculiarity of the new project must be taken in account.

Jesenice Steelworks were publicly criticized already due to disturbances which periodically appeared with the old electric arc furnaces. Thus a study and analysis of consequences in the electric energy supply network due to operation of the steel plant 2 had to be made before its construction, and measures were foreseen to prevent the negative influences. Results of the study were taken in account in the plant design. Commencement of operation of the steel plant 2 confirmed the correct measures.

Strengthening of electric energy supply network in Gorenjska and the construction of compensation set-up are a technological unit which enables undisturbed and effective exploitation of electric furnaces in steel plant 2 without negative feed back on the electric energy supply network. Thus the main aim of both investments was achieved.

But the results are even better. From the economic viewpoint the compensation set-up will become profitable in few years for Jesenice Steelworks. Perfecting its control will contribute to closer cooperation with Slovenian Electric Distribution Company in solving mutual problems.

This project in the field of compensating reactive power is the first one in Yugoslavia. We are of opinion that more attention to our experiences in this field should be paid also in the other parts of Yugoslavia by useful transfer of them into practice in their conditions.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В области приобретения стали в дуговых электрических печах мы в Югославии встречаемся с теми же самыми проблемами, которые имели те, которые были заняты с приобретением технологии этого вида производства стали до нас. Наше преимущество в том, что пользуемся, полученными опытами. Когда мы решаемся построить новый потребитель электрической энергии то надо употребить их опыты, а также и стандарты и иметь в виду специфичности нового проекта.

В металлургическом центре Есенице мы были подвергнуты публичной критики из-за помех, которые мы периодически вносили с старыми электропечами. Поэтому мы были до постройки сталеплавильного цеха 2 принуждены выполнить научный этюд и проанализировать последствия, которые нанесёт в электроэнергетической системе сталеплавильный цех 2, предусмотреть также меры, которые бы возникновения отрицательных влияний предотвратили. Результаты этюда мы взяли во внимание и их в проекте также выполнили. При пуске электродуговой печи в ход оказалось, что мы поступили правильно.

Усиление электроэнергетической системы в этой области гор и постройка компенсационного устройства составляет одно технологическое целое, которое даёт возможность без помех и эффективно использование электрической дуговой печи без появления отрицательных возвратных влияний на электроэнергетическую систему. Таким образом была достигнута главная цель обоих вложений.

Мы достигли ещё больше. С экономической точки зрения компенсационное устройство станет через несколько лет металлургическом заводу Есенице источником заработка. С усовершенствованием его устройства управления будет возможность ещё более тесное содействие с электрохозяйством Словении при разрешении взаимных проблем.

С этим проектом в области компенсации яловой энергии в Югославии пашем землю под паром. Мы себе представляем, что было бы правильно если бы нашим опытам в этой области уделили больше внимания югославская электроэнергетическая промышленность и вообще общественность и их с пользой передавала в своей среде.