

Regulacija kompenzacije in simetrije na lončni talilni peči

Darjan Gradišnik¹, Franci Tomazini²

¹ATES d.o.o., Mroževa ulica 21, 2310 Slovenska Bistrica

²Impol 2000, d. d., Partizanska 38, 2310 Slovenska Bistrica
darjan.gradisnik@ates.si

Regulation of compensation and symmetry on crucible melting furnace

In Impol, a decision has been made to reconstruct old pot melting furnaces. Induction coil, which enables induction melting of the material, is a single-phase load connected to a three-phase transformer. In such connection, the necessary phase shifts of the interphase currents have to be ensured in order for the phase currents to be aligned with phase voltage and for the load to behave as ohm resistant and symmetric against the three-phase generator. This way, the highest efficiency in the melting process is achieved. Furthermore, the currents that burden the elements in the circuit are the smaller. The control input via multiple current transformers has been replaced with PAC 4200 measuring center connected to the S1200 r through MODBUS.

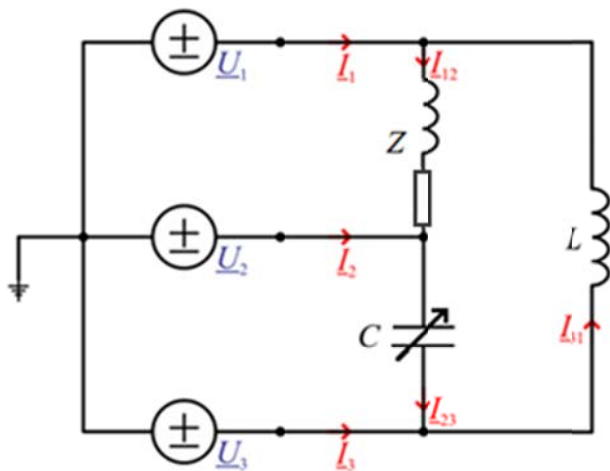
Kratek pregled prispevka

V Impolu so se odločili za posodobitev starejših lončnih talilnih peči. Indukcijska tuljava, ki omogoča indukcijsko taljenje materiala, je enofazno breme, ki pa je priključeno na trifazni transformator. Pri takem priklopu je potrebno zagotoviti potrebne fazne premike medfaznih tokov, da dobimo fazne tokove isto ležne s faznimi napetostmi in se breme proti tri faznemu generatorju obnaša kot ohmsko in simetrično. V tem primeru imamo največji izkoristek v procesu taljenja in najmanjše tokove, ki obremenjujejo elemente v vezju. Regulacijski vhod preko večkratnih tokovnih transformatorjev se je nadomestil z merilnim centrom PAC 4200, ki je v zanko povezan preko MODBUS protokola na krmilnik S1200.

1 Uvod

V livarni IMPOL so se odločili za posodobitev dveh indukcijskih talilnih peči za aluminij. Peči sta bili izgrajeni 1980, edina posodobitev je bila zamenjava PCB kondenzatorjev. Posodobitev poteka fazno – najprej zamenjava regulacije kompenzacije in simetriranja, nato bo sledila še posodobitev krmilja peči.

2 Predstavitve vezave indukcijske tuljave



Slika 1: Medfazne napetosti in medfazni tokovi.

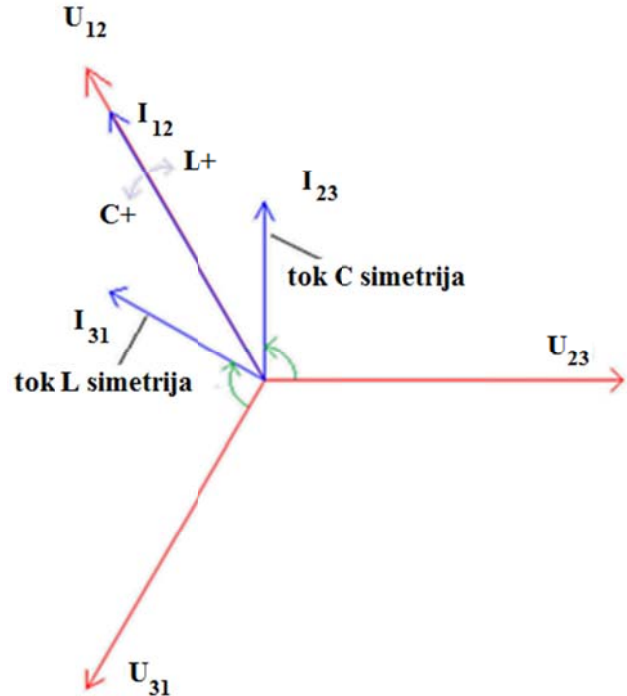
To vezavo uporabljajo pri energijskem napajanju uporovnega dvopola velike moči, ki ga ne smemo priključiti na omrežje, brez da bi zelo porušili njegove parametre. Če izberemo parametre vezja tako, da je:

- $Z = R$
- $1/\omega C = \sqrt{3}R$
- $\omega L = \sqrt{3}R$

dobimo simetrične kazalce faznih tokov, ki so paroma v fazi s faznimi napetostmi. Čeravno je breme nesimetrično, se z vidika virov obnaša kot simetrično uporovno breme (slika2).

Kako to zagotoviti v praksi, ko se impedanca Z vseskozi spreminja v odvisnosti od količine in stanja materiala v peči?

Paralelno z impedanco induktorja (I_{12}) so povezane kompenzacijske baterije, v veji toka I_{23} pa spreminjamo kapacitivnost v mejah od 0.75 do 1.25 nazivne vrednosti.



Slika 2: Medfazne napetosti in medfazni tokovi.

Zapišimo kompleksorje faznih in medfaznih napetosti v komponentni obliki:

$$\widehat{U}_1 = jU_f \quad (1)$$

$$\widehat{U}_2 = \frac{1}{2}(\sqrt{3} - j)U_f \quad (2)$$

$$\widehat{U}_3 = \frac{1}{2}(\sqrt{3} - j)U_f \quad (3)$$

$$\widehat{U}_{12} = \frac{1}{2}(-1 + j\sqrt{3})U_{mf} \quad (4)$$

$$\widehat{U}_{23} = U_{mf} \quad (5)$$

$$\widehat{U}_{31} = \frac{1}{2}(-1 - j\sqrt{3})U_{mf} \quad (6)$$

Izračunajmo bremenske tokove skozi posamezne veje:

$$\widehat{I}_{12} = \frac{1}{2}(-\sqrt{3} + j3)U_f/R \quad (7)$$

$$\widehat{I}_{23} = \left(\frac{j}{R\sqrt{3}}\right)U_{23} = j U_f/R \quad (8)$$

$$\widehat{I}_{31} = \frac{1}{2}(-\sqrt{3} + j)U_f/R \quad (9)$$

V tem koraku izračunajmo še fazne tokove:

$$\widehat{I}_1 = \widehat{I}_{12} - \widehat{I}_{31} = \widehat{U}_1/R \quad (10)$$

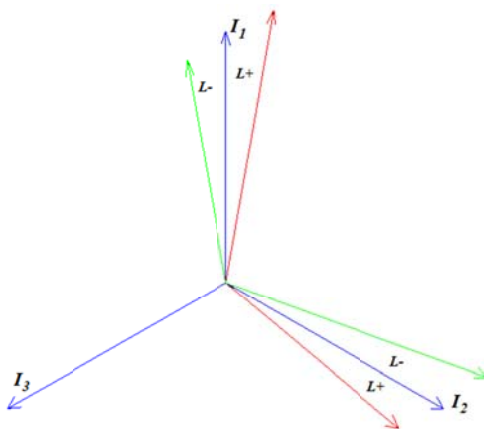
$$\widehat{I}_2 = \widehat{I}_{23} - \widehat{I}_{12} = \widehat{U}_2/R \quad (11)$$

$$\widehat{I}_3 = \widehat{I}_{31} - \widehat{I}_{23} = \widehat{U}_3/R \quad (12)$$

3 Princip regulacije kompenzacije in simetrije

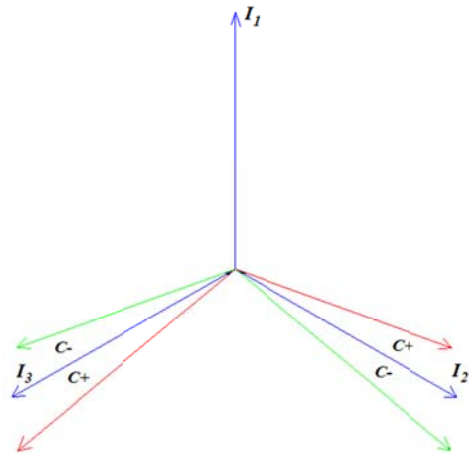
Da bi lažje razumeli kompleksnost regulacije, si pogledjmo, kaj se v procesu dogaja s kazalci tokov.

Najprej spreminjajmo induktivnosti induktorja (to je tuljava okoli peči). Pri taljenju se induktivnost povečuje, upornost pa upada. Peč se najprej napolni z neraztaljenim aluminijem (legurami), zato najprej stečejo kratkostični tokovi. Povečanje induktivnosti kompenziramo (ohranjamo resonančno frekvenco 50Hz) z dodajanjem kondenzatorskih baterij (slika 3):



Slika 3: Pomik kazalcev toka pri spremembi L.

Iz tega izhaja, da spreminjamo velikost kompenzacije s primerjavo absolutnih vrednosti tokov I_1 in I_2 ($L+ \Rightarrow I_1+, I_2-$; $L- \Rightarrow I_1-, I_2+$).



Slika 4: Pomik kazalcev toka pri spremembi C.

Iz tega izhajajo naslednja pravila:

- $I_1 > I_2$ – povečaj kompenzacijo
- $I_1 > I_2$ – zmanjšaj kompenzacijo
- $I_2 > I_3$ – dodaj kapacitivnost v fazi 2
- $I_2 > I_3$ – odvzemi kapacitivnost v fazi 2

Ali drugače, regulirati je možno tako kompenzacijo v veji 12 kot kapacitivnost v veji 23 samo s kontrolo tokov! Vendar smo se odločili, da ohmski karakter induktorske tuljave reguliramo direktno preko merjenja faznega kota v veji 12, simetrijo pa nadzorujemo preko tokov.

4 Izvedba regulacije

Dosedanja regulacija se je izvajala preko dvigovanja in nižanja kondenzatorskih stopenj, ki so binarno sestavljene (1-2-4-..). Nova regulacija bo tako imela 4 izhode, ki bodo vključeni v obstoječe krmilje. Ko pa se bo posodobil še krmilni del peči, se bo prešlo na direktni vklop ustrezne skupine, ker se tako izognemo dolgotrajnemu preklapljanju ob zaključku procesa in začetku novega, ko se induktivnost peči zelo spremeni. To je omogočeno zaradi izračuna vrednosti potrebne kompenzacije:

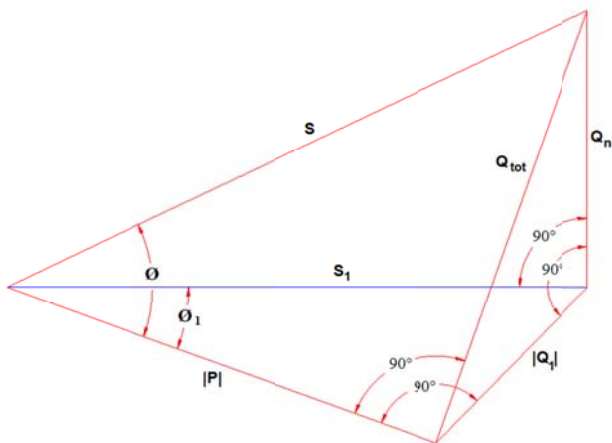
$$\widehat{I}_1 = \widehat{I}_{12} - \widehat{I}_{31} = \widehat{U}_1/R \quad (10)$$

$$Q = \frac{U^2 * C}{2} \quad (13)$$

Iz slike 3 in 4 vidimo, da se tok I_2 spreminja v obeh primerih. Da povečamo stabilnost sistema, se najprej zagotovi ohmski značaj bremena, nato pa še simetriranje tokov. Zanki sta časovno ločeni preko takta, kjer se v prvi pol periodi izvaja ena, nato pa druga regulacijska zanka.

Ponavadi v regulator vodimo analogne signale, v našem primeru pa smo kot večkanalni vhod uporabili Siemensov merilni center Sentron PAC4200, ki omogoča tudi prikaz kazalcev napetosti in toka. Preko MODBUS protokola se v krmilnik ciklično (1s) prenašajo razen napetosti, tokov, moči in $\cos \emptyset$ še energije, da lahko energijsko ovrednotimo proces, velikost jalove energije pri določeni napetosti pa omogoči točen izračun, koliko kapacitivnosti moramo dodati ali odvzeti.

Pri merjenju $\cos \emptyset$ moram poudariti še eno dejstvo, da enačba $S * \cos \emptyset = P$ velja samo pri sinusnih veličinah, sicer moramo upoštevati univerzalni trikotnik moči, prikazan na sliki 5. Sestavljen je iz osnovnega harmonika, višje harmonikov in vektorske vsote obeh. To je zelo pomembno pri sodobnih močnostnih enotah, ki zaradi preklopnega delovanja močno popačijo sinusno obliko tokov.



Slika 5: Univerzalni 3D trikotnik moči.

Ker se v našem primeru krmiljenje moči izvaja s preklopnikom na izvodih transformatorja, je ta problem manj izrazit.

Na osnovi več parametrov se izračunava tudi t.i. G faktor, ki preko transformirane upornosti jedra (kovinski vložek) prikazuje stanje procesa, kar je bilo do sedaj zelo odvisno od izurjenosti operaterja, preko tega parametra pa se lepo vidi, kdaj je proces prešel v stacionarno stanje – ves vložek je raztaljen.

Parametri električne energije se shranjujejo tudi v datoteko tipa *.csv, ki jo lahko snamemo preko Web serverja in ni potrebno dodatno vgraditi kakega drugega orodja za arhiviranje podatkov.

5 Povzetek

Peč ima nazivno moč 850 kW. V primeru, da ne dosegamo paralelne resonance ($1/\omega C \neq \omega L$) skozi ves proces to pomeni, da postopek traja dlje, poraba energije je že samo zaradi izgub v procesu večja, pojavljajo pa se tudi druge neželene posledice v procesu (del materiala na vrhu se ne raztali). Pri indukcijskem taljenju imamo kombinacijo kratkostičnih in induciranih tokov. Da se simetričnemu priklopu čim bolj približamo, mora regulacija omogočati hitro odzivnost na spremembe impedance vložka.

Pri posodabljanju se večkrat pokaže, da lahko stare rešitve, ki so bile s klasičnimi analognimi regulatorji težko rešljive, z uvedbo novih digitalnih sklopov uspešneje realiziramo in tako procese energijsko optimiramo in se približamo teoretičnim vrednostim energijskega vložka. Pri takih močeh se torej investicija v prenavo hitro povrne – pa še ekološko se obnašamo.

6 Literatura

- [1] eELEplus – multimedijško didaktično spletno gradivo s področja elektrotehnike, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Laboratorij za osnove elektrotehnike in elektromagnetiko, Ljubljana 2018
- [2] OTTO JUNKER GmbH – interna navodila za regulacijo, Simmerath 1980
- [3] Siemens GmbH – interna navodila PAC 4200, 2019