

Simulacija inverterskega varilnega izvora in MIG/MAG postopka varjenja

Marjan Golob

**Fakulteta za elektrotehniko računalništvo in informatiko
Univerza v Mariboru
Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija
mgolob@uni-mb.si**

Simulation of inverter welding power source and MIG/MAG welding process.

Dynamic behavior is of great importance for an efficient welding power supply, but often has not been investigated together with dynamic behavior of the electric arc welding process. This article presents the problems of development inverter welding power sources based on modeling and simulation techniques. Simulation model of inverter power source with current controller is implemented together with simulation model of MIG/MAG welding process. The combined simulation of both models shows the advantages of using simulation methods by the rapid development of hardware and software for welding equipment.

Kratek pregled prispevka

Dinamične lastnosti so zelo pomembne za učinkovito delovanje varilnega izvora varilne naprave, vendar pogosto niso bile obravnavane v povezavi z dinamičnim obnašanjem elektroobločnega procesa varjenja. Prispevek predstavlja probleme pri razvoju inverterskih varilnih izvorov, ki temeljijo na metodah modeliranja in simulacij. Simulacijski model inverterskega varilnega izvora s tokovnim regulatorjem je izveden skupaj s simulacijskim modelom MIG/MAG varilnega procesa. Hkratna simulacija obeh modelov izpostavlja prednosti simulacijskih metod pri hitrem razvoju strojne in programske opreme novih varilnih naprav.

1 Uvod

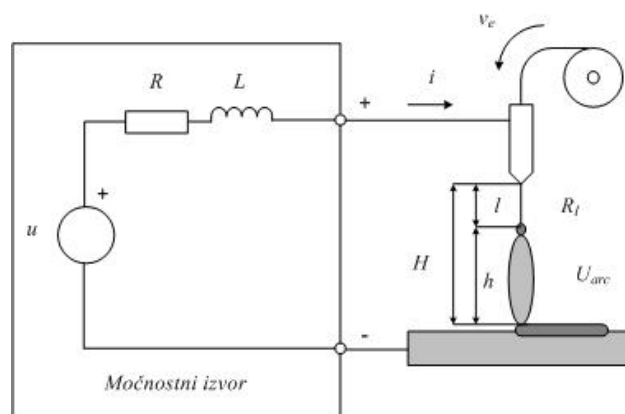
V kolikor želi proizvajalec varilnih naprav ostati konkurenčen na trgu mora obvladovati hiter proces razvoja tako strojne, kot programske opreme varilnih naprav. Pri tem je zelo pomemben kratek čas realizacije projekta od ideje do novega izdelka na trgu. Čas razvoja novega izdelka je možno skrajšati z obvladovanjem novih tehnologij hitrega razvoja prototipov in modernih simulacijskih tehnik. Z razvojem računalniške tehnologije so se simulacijske tehnike uveljavile tudi na področju razvoja varilnih tehnologij in razvoja varilnih naprav. Simulacije se uporabljajo za analizo elektroobločnih varilnih postopkov na osnovi različnih matematičnih modelov [1], [2] in za potrebe razvoj regulacijskih algoritmov [3], [4], [5].

V prispevku je predstavljen primer uporabe simulacijskih modelov varilnega izvora in simulacijskih modelov varilnega procesa v enem simulacijskem okolju. Opisan je matematični model MIG/MAG varilnega postopka, ki je osnova za simulacijski model varilnega procesa. Temu smo dodali simulacijski model inverterskega vezja v programu Matlab/Simulink, ki omogoča analizo delovanja in razvoj tokovnega regulatorja inverterskega vezja s pulzno širinsko modulacijo (PWM – angleško: Pulse Width Modulation).

Povezava obeh modelov omogoča izvedbo koncepta delnega vključevanja strojne opreme v simulacijsko zanko (angleško: Hardware-in-the-Loop Simulation) in koncepta pospešenega razvoja regulacijskih algoritmov (ang. Rapid-Control-Prototyping) varilnih izvorov [6], [7]. Za obe metodi je značilna uporaba simulacijskih modelov posameznih gradnikov pri razvoju prototipov naprav, programske opreme in tudi novih tehnoloških postopkov, na primer novih postopkov elektroobločnega varjenja.

2 Matematični model MIG/MAG postopka varjenja

MIG/MAG postopek varjenja je eden od temeljnih postopkov elektroobločnega spajanja materialov in je v številnih raziskavah dobro opisan. Za potrebe simulacij pri razvoju varilnih naprav smo se omejili na matematične modele, ki zadovoljivo opisujejo dinamično obnašanje varilnega procesa. Električni izvor varilne naprave in sam postopek elektroobločnega varjenja lahko obravnavamo kot enostavni električni tokokrog, predstavljen na sliki 1.



Slika 1: Električni tokokrog elektroobločnega postopka varjenja z dodatno elektrodo.

Električni izvor varilne naprave je predstavljen kot napetostni vir z znano napetostjo u , ki jo obravnavamo kot vhodno veličino modela. Parametra električnega izvora sta njegova induktivnost L in notranja upornost R , izhodna veličina modela izvora pa je varilni tok i . V primeru elektroobločnega postopka varjenja z dodatnim materialom se oblok vzpostavi med varjencem in taljivo elektrodo, ki jo dodajamo s hitrostjo v_e , za kar poskrbi ustrezna podajalna naprava. Elektroda se dodaja v obliki varilne žice iz zlitine, ki ima svojo specifično upornost ρ . Na osnovi te, preseka elektrode A in razdalje dela elektrode od mesta izgorevanja do mesta kontakta s šobo varilne pištole l , lahko izračunamo upornost dodatne elektrode R_l . Med varjenjem se med elektrodo in varjencem ustvari električni oblok, ki je fizikalno gledano zapleten pojav. V številnih

študijah so električni oblok avtorji obravnavali na različne načine, kjer so bolj ali manj natančno opisali odvisnost napetosti električnega obloka u_{arc} od parametrov, kot so dolžina obloka h , lastnosti zaščitnih plinov v primeru MIG/MAG postopka varjenja, načina prenosa materiala, in številnih drugih. V primeru električnega tokokroga na sliki 1 lahko predpostavimo, da so veličine u , R , L , ρ , and A neodvisne veličine, oziroma parametri modela, veličine i , l , in u_{arc} pa odvisne veličine v enačbi:

$$u = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + i \cdot R_l + u_{arc} \quad (1)$$

Upornost dodatne elektrode R_l pa lahko obravnavamo kot vsoto dveh delov: upornosti ne-staljene elektrode in upornosti kapljice, ki predstavlja vnos materiala iz elektrode na varjenec. V delu [8] je podrobno opisan postopek modeliranja elektroobločnega procesa varjenja, ki upošteva model nelinearni hitrosti taljenja elektrode in model spreminjanja napetosti električnega obloka. Napetostno enačbo električnega tokokroga na sliki 1 zapišemo kot:

$$u = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + i \cdot \frac{\rho}{A} \cdot l + u_{a+c} + E \cdot h + i \cdot R_{arc} \quad (2)$$

Ob upoštevanju modela taljenja elektrode dobimo enačbo za hitrost spreminjanja dolžine obloka:

$$\frac{dh}{dt} = k_1 \cdot i + k_2 \cdot i^2 \cdot l - v_e - v_c \quad (3)$$

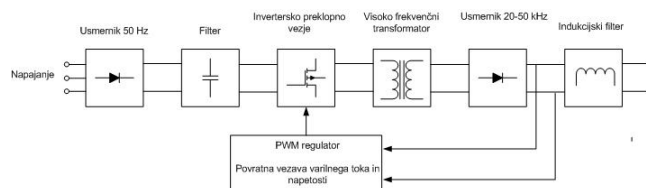
Model lahko zapišemo v prostoru stanj in pri tem uvedemo tri spremenljivke stanja: varilni tok $x_1 = i$, dolžino obloka $x_2 = h$ in razdaljo med kontaktom pištole in varjencem $x_3 = H$. Ob upoštevanju treh vhodnih spremenljivk $u_1 = u$, $u_2 = v_e$ in $u_3 = v_c$ in ene izhodne veličin $y = x_1$, dobimo nelinearni model procesa zapisan v prostoru stanj:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= \frac{1}{L} \cdot \left(u_1 - R \cdot x_1 - \frac{\rho}{A} \cdot x_1 \cdot (x_3 - x_2) - u_{a+c} - E \cdot x_2 - x_1 \cdot R_{arc} \right) \\ \frac{dx_2}{dt} &= k_1 \cdot x_1 + k_2 \cdot x_1^2 \cdot (x_3 - x_2) - u_2 - u_3 \\ \frac{dx_3}{dt} &= u_3 \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (4)$$

Nelinearni model procesa elektroobločnega varjenja z dodatno elektrodo (4) ne upošteva pomembnih fizikalnih pojavov, kot je nastanek in rast varilne kapljice, odcepitev kapljice od elektrode in prelet varilne kapljice preko obloka. Pri izbiri modela za potrebe načrtovanja regulacijskih sistemov je potrebno upoštevati pravo razmerje med kompleksnostjo modela na eni strani in možnostjo realizacije modela v simulacijski obliki na drugi strani.

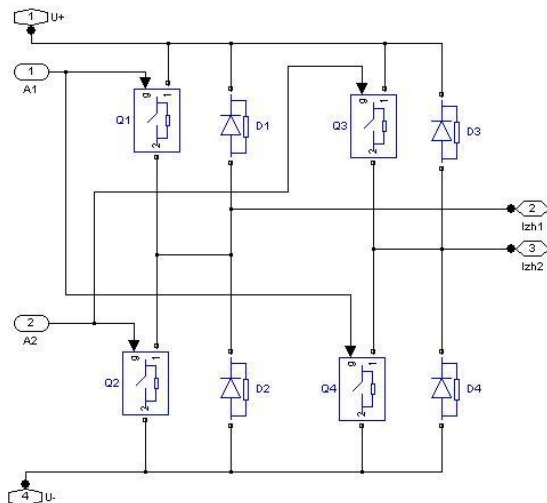
3 Simulacijski model inverterskega varilnega izvora

Inverterski izvor, na sliki 2, sestavljajo naslednji gradniki: usmerniško vezje, ki izmenično omrežno napetost usmeri in filtrira, invertersko preklopno vezje, ki enosmerni signal razsmeri na višjo frekvenco, visokofrekvenčni feritni transformator, visokofrekvenčni usmernik in indukcijski filter. V veliki večini primerov so inverterska preklopna vezja izvedena kot DC-DC pretvorniki z polnim mostičnim vezjem. Stikalna vezja v polnem mostiču so izvedena z močnostnimi elektronskimi elementi, kot so na primer MOSFET tranzistorji, IGBT tranzistorji in drugi. Stikalna vezja krmilimo z mikroročunalniško podprtimi pulzno širinskimi krmilnimi vezji ali pulzno širinskimi - PWM (Pulse Width Modulation) regulatorji.



Slika 2: Električna blokovna shema inverterskega varilnega izvora.

Za simulacijo elektronskih vezij se uporabljajo namenski simulacijski programi, kot so na primer MultiSim, PowerSim, SPICE in drugi. Programi omogočajo analizo delovanja posameznih elementov in vezij, niso pa primerni za povezovanje simulacijskih shem elektronskih vezij z aplikacijami izven področja močnostne elektronike. Zato smo se odločili simulirati elektronska vezja inverterja kar v programu Matlab Simulink. To nam omogoča uporaba simulacijskih blokov iz Simulink knjižnice SimPowerSystems. Najpomembnejši element inverternega varilnega izvora je inverterno preklopno vezje, izvedeno s polnim mostičem. Simulacijska shema enofaznega polnega mostiča, izvedena s SimPowerSystems bloki, je na sliki 3:



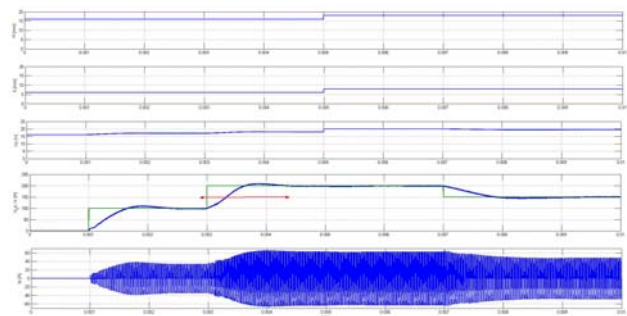
Slika 3: Simulacijska shema inverternega preklopno vezja v izvedbi polnega mostiča DC-DC pretvornika.

4 Simulacija inverternega izvora in elektroobločnega postopka varjenja

Oba modela, simulacijski model elektroobločnega postopka varjenja in simulacijski model inverternega varilnega izvora, smo združili v skupni simulacijski shemi. Simulacija nam omogoča opazovanje medsebojne odvisnosti obeh modelov, saj je obremenitev inverternega varilnega izvora odvisna od izhoda simulacijskega modela elektroobločnega postopka varjenja. Na ta način lahko simuliramo delovanje varilnega izvora pri

različnih načinih krmiljenja varilnega toka (enosmerni tok, pulzni tok, itd.).

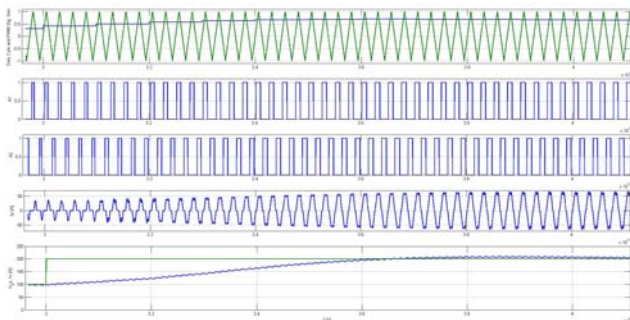
Na sliki 4 so predstavljeni časovni poteki signalov simulacije, kjer smo s PI regulatorjem varilnega toka spreminjali kot odprtja na polnem mostiču inverterja varilnega izvora. Pri tem smo predpostavili konstantno hitrost varjenja na avtomatski varilni napravi in nastavili razdaljo med varilno pištolo in varjencem (H) na 16 mm. Pri času $t = 5\text{ms}$ smo predpostavili spremembo te razdalje (nemirna roka varilca) za 2 mm na 18 mm. Hitrost dodajanja varilne žice je bila konstantna 70 mm/s, spreminjali pa smo želeno vrednost varilnega toka. Po 1 ms smo povečali varilni tok z 0 A na 100 A, po 3 ms na 200 A in po 7 ms na 150 A. Četrti graf na sliki 4 prikazuje časovni potek spreminjanja varilnega toka na spremembo želene vrednosti. Prehodni pojavi so stabilni, prenehaj je minimalen in čas izravnave je sprejemljivo kratek. Za razumevanje delovanja DC-DC pretvornika smo na petem grafu dodali časovni potek spreminjanja toka na primarni strani visokofrekvenčnega transformatorja.



Slika 4: Rezultati simulacije varilnega procesa z PWM regulacijo varilnega toka in inverternim varilnim izvorom.

Frekvenca izmeničnega toka na primarni strani je 40 kHz. Na sliki 5 so predstavljeni PWM krmilni signali, kot so generator žagaste napetosti, kot odprtja, signala A1 in A2, ki odpirata tranzistorje. Časovno okno rezultatov je zmanjšano na interval približno 1,2 ms. Ta je na sliki 4 označen z puščico v grafu 4. Prvi graf prikazuje signal iz PWM generatorja žage. Tega

primerjamo z kotom odprtja, ki ga dobimo iz PI tokovnega regulatorja.



Slika 5: Prikaz PWM krmilnih signalov v odvisnosti od kota odprtja.

Na drugem in tretjem grafu sta časovna poteka krmilnih signalov A1 in A2, ki odpirata tranzistorje. Širina pulza se veča, kar ima za posledico povečanje varilnega toka. Tok lahko opazujemo na primarni strani transformatorja (četrti graf) ali na izhodu varilnega izvora. Pri teh simulacijah smo izbrali korak simulacije 0,1 μ s. Čas tipanja za pri izvajanju diskretnega PI regulatorja pa je bil 0.1 ms. Opisane simulacije omogočajo načrtovanje parametrov in zahtevnejših izvedb regulatorja toka. Vzporedno regulatorju toka lahko dodamo regulator napetosti, ali preizkusimo druge regulacijske strukture, kot so kaskadna regulacija in regulator v prostoru stanj.

5 Zaključek

V delu smo predstavili uporabo simulacijskih metod pri razvoju varilnih naprav. Razvili smo simulacijski model elektroobločnega varilnega procesa z dodajno elektrodo in simulacijski model inverterskega varilnega izvora. Predlagan matematični model procesa elektroobločnega varjenja z dodajno elektrodo je izveden kot nelinearni model v prostoru stanj, ki pa ne upošteva nekaterih pomembnih fizikalnih pojavov, kot je nastanek in rast varilne kapljice, odcepitev kapljice od elektrode in prelet varilne kapljice preko obloka. Razumevanje in modeliranje teh pojavov je cilj naših nadaljnjih raziskav in rezultate bomo vključili v simulacijski model. Predstavili smo tudi simulacijski model enostavnega inverterskega varilnega izvora, ki smo ga

testirali v isti aplikaciji z varilnim procesom. Rezultati simulacije so pokazali, da inverter na osnovi polnega DC-DC pretvornika z enostavnim diskretnim PI regulatorjem varilnega toka zadovoljivo sledi spremembam referenčne vrednosti toka. S simulacijo inverterskega varilnega izvora v istem simulacijskem okolju z simulacijskim modelom varilnega procesa je omogočena analiza delovanja različnih izvedb močnostnih gradnikov varilnih izvorov, močnostnih pretvornikov, regulacijskih in krmilnih sistemov v povezavi z izbranimi varilnimi tehnologijami. Tak pristop k razvoju lahko zniža stroške in skrajša čas razvoja novih naprav.

6 Literatura

- [1] K.L. Moore D.S. Naidu, S. Ozcelik. *Modeling, Sensing and Control of Gas Metal Arc Welding*. Elsevier, 2003.
- [2] R. Yender J. Tyler K.L. Moore, D.S. Naidu. Gas Metal Arc Welding Control: Part 1 – Modeling and Analysis. In *Nonlinear Analysis, Methods and Applications*, volume 30, pages 3101–3111. Proc. 2nd World Congress of Nonlinear Analysts, 1997.
- [3] M. Golob, A. Koves, A. Puklavec, B. Torvornik. Modelling, Simulation and Fuzzy Control of the GMAW process. In *15th Triennial World Congr. Int. Fed. of Automatic Control*, 2002.
- [4] J. S. Thomsen, Control of Pulsed Gas Metal Arc Welding, *International Journal of Modelling, Identification and Control*, Volume 1, Number 2, Pages 115 – 125, 2006
- [5] J. Zhang and B. L. Walcott, Adaptive Interval Model Control of Arc Welding Process, *IEEE Trans. On Control Systems Technology*, vol. 14, no. 6, Nov. 2006, pp. 1127-1134.
- [6] B. Lu, X.Wu, H. Figueroa, and A.Monti, A Low-Cost Real-Time Hardware-in-the-Loop Testing Approach of Power Electronics Control, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 2, pp. 919–931, 2007.
- [7] G. G. Parma and V. Dinavahi, Real-Time Digital Hardware Simulation of Power Electronics and Drives, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 2, pp. 1235–1246, 2007.
- [8] M. Golob, B. Tovornik, Modelling, simulation and control of gas metal arc welding. In *7th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*, Prague, Czech Republic. Vol. 2, 2010, 6 str.