

LSQ DC 123 IIR algoritam za blokadu diferencijalne zaštite bloka i otkrivanje zemljospoja generatora

Juraj HAVELKA, Ante MARUŠIĆ i
Marko DELIMAR

Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta
u Zagrebu (Faculty of Electrical Engineering and
Computing University of Zagreb),
Unska 3, HR - 10000 Zagreb,
Republic of Croatia

juraj.havelka@fer.hr

Ključne riječi

Frekvencija uzimanja uzoraka
Harmonici
IIR (filtar s beskonačnim odzivom)
LSQ (najmanji kvadrati)
Numerička zaštita
Zaštitne funkcije

Keywords

Digital protection
Harmonics
IIR (infinity impulse response)
LSQ (least squares)
Protection functions
Sampling frequency

Received (primljeno): 2008-04-15

Accepted (prihvaćeno): 2009-02-27

1. Uvod

Algoritam koji brzo otkriva amplitudu osnovnog i trećeg harmonika napona te amplitudu drugog harmonika struje koristan je kod digitalne generatorske zaštite koja služi za stopostotnu zaštitu namota statora od zemljospoja uz pomoć funkcija 27TN i 59N (slika 1), ili funkcije 59TN i 59N (slika 2). Amplituda drugog harmonika struje služi za blokadu diferencijalne zaštite bloka (funkcija 87U) u slučaju magnetiziranja transformatora. Blok shema spoja funkcije 87U je prikazana na slici 3. Upravo za tu namjenu je razvijen

Izvornoznanstveni članak

U radu je prikazan LSQ DC 123 IIR algoritam, razvijen na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu, koji je dobiven iz originalnog LSQ IIR algoritma. Glavna namjena algoritma je blokada numeričkih zaštitnih uređaja pri magnetiziranju energetskih transformatora spojenih u bloku s generatorom i stopostotna zaštita generatora od zemljospoja. Analiziran je rad LSQ DC 123 IIR algoritma te je prikazano učinjeno poboljšanje u odnosu na LSQ algoritam koji je u praktičnim uvjetima neupotrebljiv. LSQ DC 123 IIR algoritam računa istosmjernu komponentu signala te amplitude prvog, drugog i trećeg harmonika iz mjerenih valnih oblika napona i struja. Uz amplitudne vrijednosti algoritam daje i fazne, kao što su kutovi osnovnog, drugog i trećeg harmonika između svih mjerenih valnih oblika električnih signala. Iz algoritma je također moguće dobiti i vremensku konstantu istosmjerne prigušujuće komponente koja se javlja pri kratkom spoju. Iz dobivenih vrijednosti se donose zaključci prema tome je li nastupio kvar ili je potrebno blokirati proradu numeričke zaštite bloka generator-transformator.

LSQ DC 123 IIR Algorithm for Unit Differential Protection Restraint and Generator Ground Fault Detection

Original scientific paper

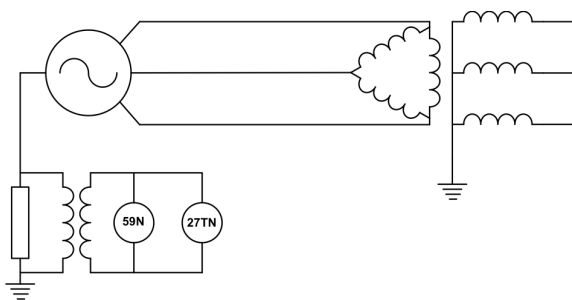
The LSQ DC 123 IIR algorithm, developed at Faculty of Electrical Engineering and Computing University of Zagreb, derived from the original LSQ IIR algorithm is discussed in the paper. The main purpose of the algorithm is digital protection relay restraint during the energisation (inrush current) of unit transformer and 100 % generator ground fault protection. The operation of LSQ DC 123 IIR algorithm is analyzed and the obtained improvement is presented in relation to LSQ algorithm, which is totally useless in practice. The LSQ DC 123 IIR algorithm is used in extracting amplitude of DC component and amplitudes of fundamental, second and third harmonics from measured current and voltage waveforms. The algorithm also calculates phase angles between all measured current and voltage waveforms. If the time constant of decaying DC component is needed it is also available from algorithm. Based on algorithm output values decisions are made whether digital protection relays should trip or if restraint of unit generator transformer differential protection is necessary.

LSQ DC 123 IIR algoritam koji je dobiven iz originalnog LSQ IIR algoritma [1]. Oba algoritma predstavljaju poboljšanje u odnosu na LSQ [2] algoritam koji je u praktičnim uvjetima neupotrebljiv.

Ovisno o mjestu nastanka zemljospoja u odnosu na namot statora ovisi i koliki će biti treći harmonik napona na stezaljkama generatora i u zvjezdistu generatora. Kada zemljospoj nastane u blizini zvjezdista tada su dozemni kapaciteti namota statora u blizini zvjezdista premošteni i treći harmonik pada na nulu, dok se na stezaljkama generatora javlja treći harmonik koji ima vrijednost

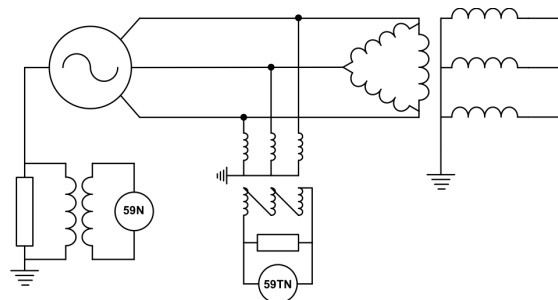
Oznake/Symbols

LSQ	- najmanji kvadrati - least squares	ω_0	- kružna frekvencija osnovnog harmonika od 50 Hz, rad/s - basic harmonic (50 Hz) angular frequency
IIR	- filter s beskonačnim odzivom - infinity impulse response	Θ_0	- kut osnovnog harmonika, rad - first (basic) harmonic phase angle
DC	- istosmjerne/prigušujuće komponente signala - decaying/constant signal component	Θ_2	- kut drugog harmonika, rad - second harmonic phase angle
27TN	- zaštita od zemljospoja statora pomoću trećeg harmonika - third harmonic ground fault generator protection	Θ_3	- kut trećeg harmonika, rad - third harmonic phase angle
59N	- nadnaponska zaštita od zemljospoja statora - overvoltage ground fault generator protection	H	- harmonik - harmonic
59TN	- nadnaponska zaštita od zemljospoja statora pomoću trećeg harmonika - third harmonic overvoltage ground fault generator protection	f_s	- frekvencija uzimanja uzorka, Hz - sampling frequency
87G	- diferencijalna zaštita generatora - generator differential protection	a_{xy}	- vremenski ovisne varijable - time related coefficients
87U	- diferencijalna zaštita bloka generator-transformator - unit differential protection	x_y	- vrijednosti funkcija nepoznatih veličina - functions of the unknowns
$v(t)$	- vrijednost valnog oblika napona u trenutku t , p.u. - value of voltage waveform in moment t	t_y	- proizvoljni vremenski trenutak uzimanja uzoraka, s - freely selected waveform sample time reference
K_{DC}	- amplituda istosmjerne komponente signala, p.u. - peak value of decaying/constant signal component	$v(t_y)$	- vrijednost valnog oblika napona u trenutku t_y , p.u. - value of voltage waveform in moment t_y
K_1	- amplituda osnovnog harmonika signala, p.u. - first (basic) harmonic peak value	Δt	- vremenski razmak između dva uzastopna uzorka signala, s - distance between signal samples along time axis
K_2	- amplituda drugog harmonika signala, p.u. - second harmonic peak value	t_{rada}	- maksimalno vrijeme s kojim algoritam smije raditi, s - maximum time whit which algorithm can operate
K_3	- amplituda trećeg harmonika signala, p.u. - third harmonic peak value	$t_{LSQdelay}$	- kašnjenje LSQ algoritma, s - LSQ algorithm delay
τ	- vremenska konstanta prigušujuće DC komponente, p.u. - decaying DC component time constant	X_n array	- polje varijabli x, y - array composed of x, y values



Slika 1. 100 %-tna zaštita od zemljospoja pomoću funkcija 27TN i 59N

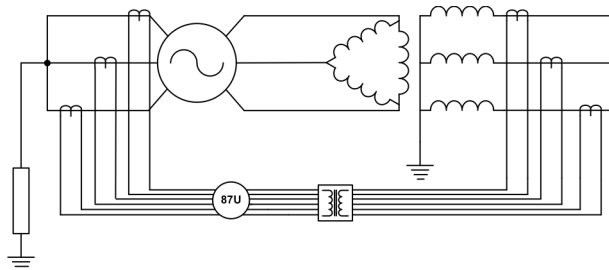
Figure 1. 100 % ground fault protection with functions 27TN and 59N



Slika 2. 100 %-tna zaštita od zemljospoja pomoću funkcija 59N i 59TN

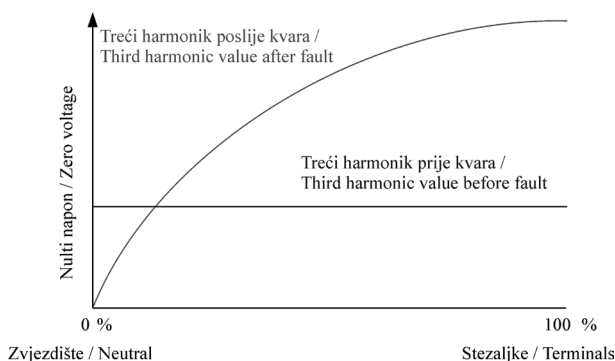
Figure 2. 100 % ground fault protection with functions 59N and 59TN

jednaku vrijednosti trećeg harmonika proizvedenog od strane generatora (slika 4). Kod zemljospoja na stezaljkama generatora je situacija obratna i tu je napon trećeg harmonika jednak nuli, dok je u zvjezdlištu jednak naponu trećeg harmonika koji proizvodi generator [3].



Slika 3. Diferencijalna zaštita bloka 87U

Figure 3. Unit generator-transformer differential protection 87U



Slika 4. Promjena amplitude trećeg harmonika nultog napona

Figure 4. Third harmonic voltages change

Postoji niz algoritama koji se mogu koristiti za mjerenje amplitude signala. U ovom radu će biti obrađen LSQ IIR algoritam s više varijabli koji predstavlja poboljšanje LSQ algoritma s više varijabli. Algoritam se može koristiti i za druge generatorske zaštitne funkcije osim funkcija 27TN, 59TN i 87U.

2. LSQ 123 algoritam s više varijabli [4]

Prije izvoda samog algoritma valja poći od dvije pretpostavke. Prva je ta da se kod rada generatora ne javljaju parni harmonici. Jedini parni harmonik je drugi koji se javlja pri magnetiziranju transformatora. Druga pretpostavka je da se ne javlja ništa više od trećeg harmonika. Valni oblik napona koje proizvodi generator može se tada izraziti pomoću jednadžbe:

$$v(t) = K_{DC} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + K_1 \cdot \sin(\omega_0 t + \Theta_1) + K_2 \cdot \sin(2\omega_0 t + \Theta_2) + K_3 \cdot \sin(3\omega_0 t + \Theta_3). \quad (1)$$

K_{DC} je amplituda istosmjerne komponente napona, K_1 je amplituda osnovnog harmonika, K_2 je amplituda drugog harmonika i K_3 je amplituda trećeg harmonika. τ je vremenska konstanta istosmjerne prigušujuće komponente.

Ako se eksponencijalni član koji prikazuje prigušenje istosmjerne komponente K_{DC} razvije u Taylorov red, i pri tome se zanemare svi članovi osim prva tri, dolazi se do izraza za valni oblik napona koji glasi:

$$v(t) = K_{DC} - K_{DC} \frac{t}{\tau} + K_{DC} \frac{t^2}{2\tau^2} + K_1 \cdot \sin(\omega_0 t + \Theta_1) + K_2 \cdot \sin(2\omega_0 t + \Theta_2) + K_3 \cdot \sin(3\omega_0 t + \Theta_3). \quad (2)$$

Pri mjerenju stvarnog valnog oblika napona pri nekoj frekvenciji uzimanja uzoraka f_s u određenom trenutku t_1 postoji uzorak signala napona koji ima vrijednost $v(t_1)$. Upravo ta izmjerena vrijednost u trenutku t_1 može se opisati jednadžbom (2) koja nakon proširenja sinusnih i kosinusnih članova poprima oblik:

$$v(t_1) = K_{DC} - K_{DC} \frac{t_1}{\tau} + K_{DC} \frac{t_1^2}{2\tau^2} + K_1 \cos \Theta_1 \cdot \sin(\omega_0 t_1) + K_1 \sin \Theta_1 \cdot \cos(\omega_0 t_1) + K_2 \cos \Theta_2 \cdot \sin(2\omega_0 t_1) + K_2 \sin \Theta_2 \cdot \cos(2\omega_0 t_1) + K_3 \cos \Theta_3 \cdot \sin(3\omega_0 t_1) + K_3 \sin \Theta_3 \cdot \cos(3\omega_0 t_1). \quad (3)$$

U jednadžbi (3) jedino je poznata izmjerena trenutna vrijednost napona $v(t_1)$ i trenutak t_1 u kojem je ta vrijednost i izmjerena dok su sve ostale vrijednosti nepoznate. Jednadžbu (3) može se napisati u obliku:

$$v(t_1) = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + a_{14}x_4 + a_{15}x_5 + a_{16}x_6 + a_{17}x_7 + a_{18}x_8 + a_{19}x_9, \quad (4)$$

gdje su vrijednosti a vremenski zavisne i poznate varijable oblika:

$$\begin{aligned} a_{11} &= 1 & a_{12} &= t_1 & a_{13} &= t_1^2 \\ a_{14} &= \sin(\omega_0 t_1) & a_{16} &= \sin(2\omega_0 t_1) & a_{18} &= \sin(3\omega_0 t_1) \\ a_{15} &= \cos(\omega_0 t_1) & a_{17} &= \cos(2\omega_0 t_1) & a_{19} &= \cos(3\omega_0 t_1), \end{aligned} \quad (4a)$$

dok su x vrijednosti funkcije nepoznatih veličina i one imaju oblik:

$$\begin{aligned} x_1 &= K_{DC} & x_2 &= -K_{DC}/\tau & x_3 &= K_{DC}/2\tau^2 \\ x_4 &= K_1 \cos \Theta_1 & x_6 &= K_2 \cos \Theta_2 & x_8 &= K_3 \cos \Theta_3 \\ x_5 &= K_1 \sin \Theta_1 & x_7 &= K_2 \sin \Theta_2 & x_9 &= K_3 \sin \Theta_3. \end{aligned} \quad (4b)$$

U nekom trenutku uzimanja uzoraka koje je jednako t_y jednadžba (4) ima oblik:

$$v(t_y) = a_{y1}x_1 + a_{y2}x_2 + a_{y3}x_3 + a_{y4}x_4 + a_{y5}x_5 + a_{y6}x_6 + a_{y7}x_7 + a_{y8}x_8 + a_{y9}x_9. \quad (5)$$

Jednadžba (4) ima devet nepoznanica (x_1 do x_9). Ukoliko postoji devet vrijednosti uzastopnih uzoraka valnog oblika napona koji su dobiveni konstantnom frekvencijom uzimanja uzoraka f_s tada postoji sustav od devet jednadžbi s devet nepoznanica čijim se rješenjem dolazi do vrijednosti x_1 do x_9 .

Neka je mjerenje devet vrijednosti valnog oblika napona izvršeno u trenucima:

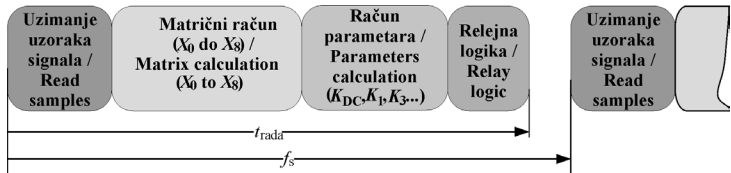
$$t_i = i \cdot \Delta t, \quad i = 0 \dots 8, \quad (6)$$

gdje je Δt međusobna udaljenost uzoraka signala koja je jednaka $1/f_s$. Tada se može pisati, uz pomoć jednadžbe (4) sljedeće:

$$\begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} & a_{04} & a_{05} & a_{06} & a_{07} & a_{08} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} & a_{18} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{27} & a_{28} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} & a_{37} & a_{38} \\ a_{40} & a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} & a_{47} & a_{48} \\ a_{50} & a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} & a_{57} & a_{58} \\ a_{60} & a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} & a_{67} & a_{68} \\ a_{70} & a_{71} & a_{72} & a_{73} & a_{74} & a_{75} & a_{76} & a_{77} & a_{78} \\ a_{80} & a_{81} & a_{82} & a_{83} & a_{84} & a_{85} & a_{86} & a_{87} & a_{88} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v(t_0) \\ v(t_1) \\ v(t_2) \\ v(t_3) \\ v(t_4) \\ v(t_5) \\ v(t_6) \\ v(t_7) \\ v(t_8) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Kako je frekvencija uzimanja uzoraka konstantna tako je Δt konstantan pa se matrica s koeficijentima a naziva matrica konstanti koja se izračuna samo jednom za određenu frekvenciju uzimanja uzoraka. Ona se računa za razne trenutke koji se mijenjaju prema izrazu (6) i za svaki trenutak se izračunaju vrijednosti a prema izrazima (4a).

Nakon što se izmjeri prvih devet uzoraka valnog oblika napona $v(t_0)$ do $v(t_8)$, moguće je pomoću matricnog računa iz jednadžbe (7) dobiti vrijednosti x_0 do x_8 . Iz tih vrijednosti i jednadžbi (4b) dolazi se do željenih parametara kao što su amplitude i fazni pomaci [4, 5]. Blok shema procesa računanja parametara je prikazana na slici 5 i ponavlja se u svakoj iteraciji kontrolne petlje.



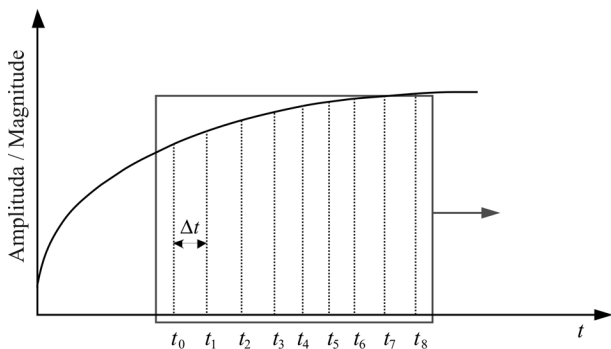
Slika 5. Blok dijagram rada LSQ algoritma

Figure 5. LSQ algorithm block diagram

Nakon što se izračunaju svi parametri nije potrebno čekati da se izmjeri novih devet točaka signala, već se primjenjuje princip rada pomoću pomičnog okvira, slika 6, u kojem se uvijek nalazi devet točaka. Nakon izračuna prema gore navedenoj proceduri (slika 6) iz okvira se izbaci najstarija točka, a ubaci se najnovija (upravo izmjerena) te se ponovi računski postupak. To je “točku po točku” analiza koja koristi najnoviju izmjerenu točku signala i točke iz prošlih iteracija kontrolne petlje. Na taj način se proračun vrši uvijek s devet točaka. Moguće bi bilo čekati mjerenje novih devet točaka prije ponavljanja proračuna, ali bi se tada javljalo kašnjenje od $9\Delta t$ pri izračunu parametara, dok se pri korištenju pomičnog okvira kasni s izračunom parametara samo onoliko vremena koliko je potrebno algoritmu za proračun. Algoritam mora raditi u realnom vremenu, a vrijeme koje je potrebno od trenutka uzimanja uzorka pa sve do trenutka kada je završen proračun parametara (slika 5) mora biti manje od vremena koje protekne između uzimanja dva uzastopna uzorka [6]:

$$t_{rada} < \frac{1}{f_s} \quad (8)$$

Ako jednadžba (8) nije zadovoljena tada algoritam ne radi u realnom vremenu što znači da se ne ponaša deterministički i kontrolna petlja ne uspijeva na vrijeme, prije uzimanja novog uzorka, izvršiti svoje zadaće. Drugim riječima, za rad u realnom vremenu kontrolna petlja mora izvršiti sve zadaće prije nego se uzme novi uzorak. Slijedi da je vrijeme koje na raspolaganju ima programska podrška toliko manje koliko je frekvencija uzimanja uzoraka veća. Ako je frekvencija uzimanja uzoraka tako velika da algoritam ne može raditi u realnom vremenu, tada je moguće umjetno smanjiti frekvenciju uzimanja uzoraka na način da algoritam za proračun koristi svaku n -tu točku. Na taj način je frekvencija uzimanja uzoraka s kojom radi algoritam n puta manja od stvarne frekvencije uzimanja uzoraka, što znači da je vrijeme koje na raspolaganju ima kontrolna petlja za proračun n puta veće.



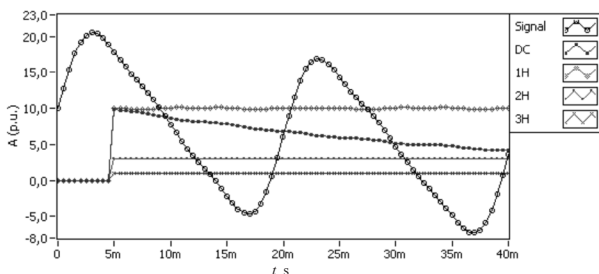
Slika 6. Pokretni okvir točku po točku
 Figure 6. Point by point moving window

3. Analiza rada LSQ algoritma sa više varijabli

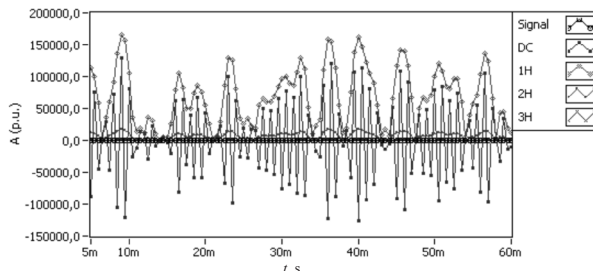
A. Simulacijski signal

Algoritam je prvo analiziran simulacijskim sinusnim signalom koji u sebi sadrži osnovni signal frekvencije 50 Hz i amplitude 10 p.u. Na taj signal je dodan drugi harmonik ($f=100$ Hz) amplitude 3 p.u., treći harmonik ($f=150$ Hz) amplitude 1,5 p.u i prigušujuća DC komponenta početne amplitude 10 p.u. čija vremenska konstanta τ iznosi 40 ms. Izračun algoritma pojedinih komponenti signala, amplitude osnovnog, drugog i trećeg harmonika i vrijednost DC komponente je za svaku iteraciju algoritma prikazan na slici 7. Algoritam nakon svake izmjerene točke signala daje točne rezultate o vrijednostima amplitude osnovnog, drugog i trećeg harmonika te o trenutnoj vrijednosti DC komponente.

Problemi nastaju ako se u signalu javle komponente koje nisu predviđene u jednadžbi (1). To su na primjer peti harmonik ili šum koji se može javiti po cijelom frekvencijskom spektru. Na slici 8 je prikazan signal koji sadrži sve iste komponente kao i signal sa slike 7 samo mu je još dodan peti harmonik amplitude 0,5 p.u. i šum po cijelom frekvencijskom spektru vrijednosti 0,01 p.u.



Slika 7. Rezultati LSQ algoritma za simulacijski signal
 Figure 7. LSQ algorithm results for simulated signal



Slika 8. Rezultati LSQ algoritma s dodanim petim harmonikom i šumom

Figure 8. LSQ algorithm results with fifth harmonic and noise in simulated signal

Iz same slike 8 proizlazi da je algoritam za ovaj slučaj potpuno neupotrebljiv zbog pogrešnog proračuna amplitude komponenti signala. U nekim trenucima je prikaz amplitude osnovnog harmonika i DC komponente i do 15 000 puta veći od stvarne vrijednosti signala u tim trenucima. Kolika će točno biti pogreška ovisi o vrijednostima komponenti koje se javljaju u signalu, a nisu predviđene jednadžbom (1). No i za male vrijednosti tih komponenti pogrešaka je izuzetno velika (slika 8) pa je algoritam neupotrebljiv ako se javi pogreška u bilo kojem obliku. Situacija se poboljša ako se iz jednadžbe (1) izbaci član za istosmjernu komponentu [5]. Jednadžba tada ima oblik:

$$v(t_1) = K_1 \cos \theta_1 \cdot \sin(\omega_0 t_1) + K_1 \sin \theta_1 \cdot \cos(\omega_0 t_1) + K_2 \cos \theta_2 \cdot \sin(2\omega_0 t_1) + K_2 \sin \theta_2 \cdot \cos(2\omega_0 t_1) + K_3 \sin \theta_3 \cdot \cos(3\omega_0 t_1) + K_3 \cos \theta_3 \cdot \sin(3\omega_0 t_1) \tag{9}$$

Matrični račun vrši se pomoću jednadžbe

$$\begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} & a_{04} & a_{05} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{40} & a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{50} & a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v(t_0) \\ v(t_1) \\ v(t_2) \\ v(t_3) \\ v(t_4) \\ v(t_5) \end{bmatrix} \tag{10}$$

Usporedbom jednadžbe (7) i (10) vidi se i poboljšanje u smanjenju broja računskih operacija. No to poboljšanje nije moguće u stvarnosti jer je DC komponenta gotovo uvijek prisutna u nekom obliku i u slučaju njenog pojavljivanja javio bi se potpuno krivi rad algoritma (isto kao na slici 8) jer bi DC komponenta predstavljala komponentu koja nije predviđena jednadžbom (9), a ipak se javlja u signalu.

B. Signal struje kratkog spoja

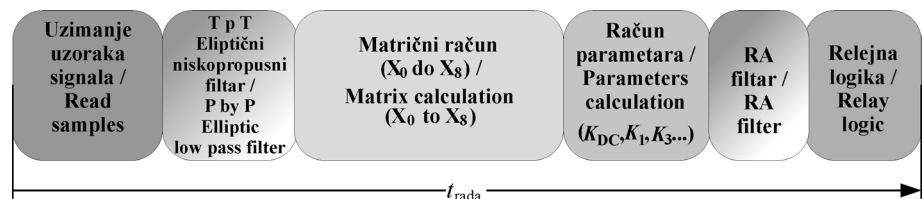
Algoritam je ispitan i sa signalom pravog trofaznog kratkog spoja. Signal kratkog spoja je važan jer se

pomoću njega ispituje ponašanje algoritma u trenutku nagle promjene amplitude signala što je upravo trenutak nastanka kratkog spoja. Na slici 9 prikazan je signal kratkog spoja dok je na slici 10 prikazan rad algoritma, zbog jednostavnosti prikaza, u samo jednoj fazi.

Iz slika 9 i 10 proizlazi da je u praksi algoritam opisan jednadžbom (1) potpuno neupotrebljiv jer nije moguće izračunati točnu amplitudu osnovnog harmonika. Izračunata amplituda je i do nekoliko stotina puta veća od stvarne vrijednosti. To vrijedi i za DC komponentu signala i za izračun amplitude trećeg harmonika (nisu prikazani na slici 10). Situacija je jednako loša prije nastanka kratkog spoja, u samom trenutku nastanka kratkog spoja i za vrijeme trajanja kratkog spoja. Razlog je taj što stvaran signal, za razliku od simuliranog, nije idealan i u sebi sadrži komponente koje nisu predviđene jednadžbom (1). Predvidjeti sve komponente u matematičkom modelu je gotovo nemoguće. Kada bi i bilo moguće tada bi jednadžba (1) sadržavala toliko komponenti da bi vrijeme računanja bilo toliko da se ne bi moglo zadovoljiti uvjete rada u realnom vremenu. Pitanje koje se nameće je kako algoritam učiniti upotrebljivim u praksi jer za sada on to očito nije.

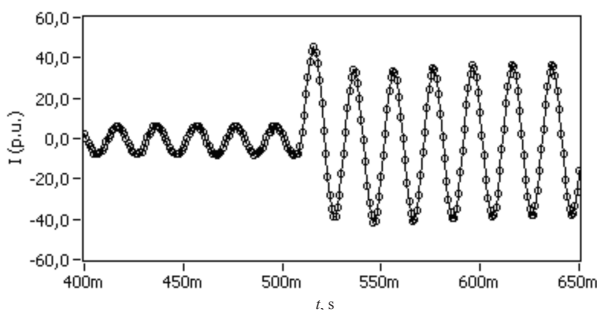
4. LSQ IIR algoritam s više varijabli

Jedan od načina poboljšanja algoritma je postavljanje nisko propusnih analognih filtera na ulaz u sklopovlje za uzimanje uzoraka koji bi imali graničnu frekvenciju, za algoritam dobiven jednadžbom (1), oko 160 Hz i na taj način bi se izbjegla pojava komponenti signala koje imaju frekvenciju iznad 160 Hz. Problem je da se samim time ne može odrediti valni oblik prelaznih pojava koje nastaju u trenutku kvara ili nekih drugih poremećaja jer bi one bile tada prigušene. Ako je u nekom zaštitnom releju na primjer frekvencija uzimanja uzoraka 20 000 Hz tada nema smisla koristiti nisko propusni analogni filter s graničnom frekvencijom 160 Hz, već se koriste granične frekvencije koje sprječavaju aliasing [4]. Ako se pretpostavi da nisko propusni analogni filter ima graničnu frekvenciju od 10 000 Hz. tada je problem algoritma dobivenog jednadžbom (1) sadržan u svim komponentama signala između 150 Hz i 10 000 Hz koje nisu predviđene u jednadžbi.



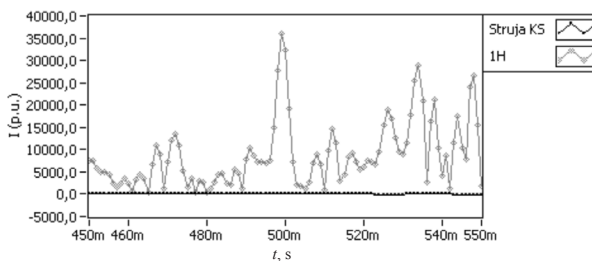
Slika 11. Blok dijagram rada LSQ IIR algoritma

Figure 11. Block diagram for LSQ IIR algorithm steps



Slika 9. Struja u fazi A pri trofaznom kratkom spoju

Figure 9. Three-phase short circuit current in phase A



Slika 10. Rezultati LSQ algoritma za struju 3KS u fazi A

Figure 10. LSQ algorithm results for 3 phase fault current in phase A

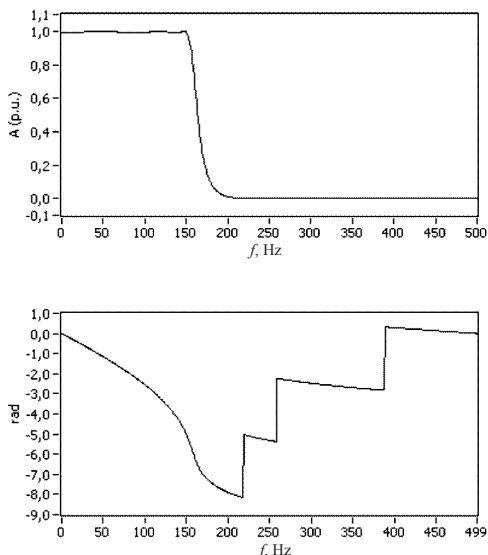
Rješenje je u upotrebi nisko propusnog digitalnog filtra (slika 11) koji radi na principu točku po točku i koji filtrira svaku točku signala prije nego što ju sam LSQ algoritam koristi za proračun.

Nakon brojnih analiza odabran je nisko propusni eliptični digitalni filter [5] reda 6 i granične frekvencije 151 Hz (slika 12). Prigušenje i dopuštene pogreška su standardni i iznose 60 dB i 0,1 %.

5. Analiza rada LSQ IIR algoritma

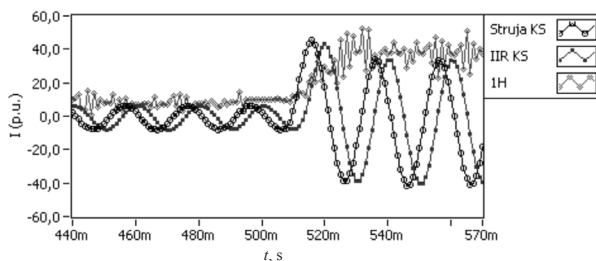
A. Signal kratkog spoja

Ako se algoritam sada ispita signalom sa slike 9 dobivaju se rješenja algoritma koja su prikazana na slici 13 koja prikazuje signal kratkog spoja, isti taj signal nakon filtriranja točku po točku i rezultate algoritma. Usporedbom slike 10 i slike 13 vidljivo je kako se neupotrebljivi algoritam dodavanjem nisko propusnog eliptičnog filtra pretvorio u upotrebljivi algoritam.



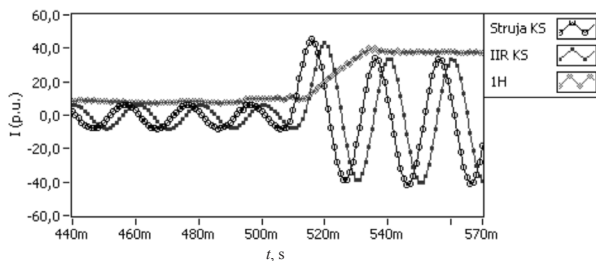
Slika 12. Amplitudni i fazni odziv niskopropusnog eliptičnog filtra, $f_c=151$ Hz

Figure 12. Elliptic low pass filter ($f_c=151$ Hz) amplitude and phase response



Slika 13. Rezultati LSQ IIR algoritma za struju 3KS u fazi A

Figure 13. LSQ IIR algorithm results for 3 phase fault current in phase A



Slika 14. Rezultati LSQ IIR algoritma za struju 3KS u fazi A + RA filter

Figure 14. LSQ IIR algorithm results for 3 phase fault current in phase A + RA filter

Kašnjenje eliptičnog filtra za opisano podešenje je 3 ms. Kašnjenje samog LSQ algoritma računa se prema jednadžbi

$$t_{LSQdelay} = \text{Size}[X_n \text{array}] / f_s \dots n = 1 \dots N \quad (11)$$

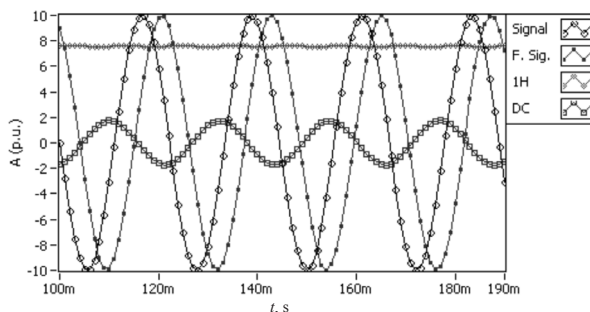
X_n array je polje varijabli x čija veličina ovisi o broju komponenti koje sadrži jednadžba (1), a f_s je frekvencija uzimanja uzoraka signala s kojom algoritam radi. Za ukupno kašnjenje LSQ IIR algoritma potrebno je na rezultat jednadžbe (11) dodati vrijeme potrebno za proračun, koje mora biti manje od vremena opisanog jednadžbom (8) kako bi bio zadovoljen rad kontrolne petlje u realnom vremenu, i vrijeme kašnjenja samog filtra koje je u opisanom slučaju 3 ms.

Filtriranjem samih parametara, dobivenih proračunom algoritma, pomoću running average ili integralnog filtra (slika 11) dolazi se do još točnijeg prikaza izračuna amplitude valnog oblika mjereno signala (slika 14).

B. Promjena frekvencije signala osnovnog harmonika

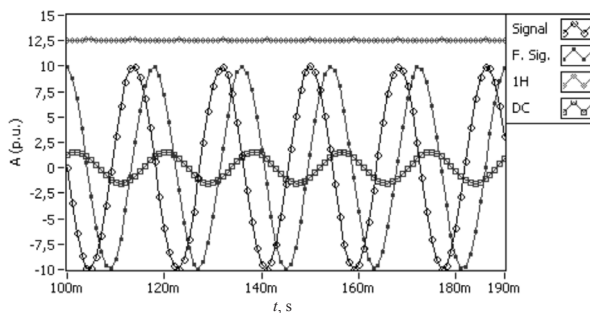
Matrica konstanti a (7) izračunata je za konstantnu frekvenciju uzimanja uzoraka signala f_s ali isto tako je izračunata i za konstantu frekvenciju osnovnog harmonika f_0 koja je u ovom slučaju 50 Hz. Upravo iz tog razloga se pri promjeni frekvencije osnovnog harmonika signala javljaju pogreške u proračunu vrijednosti algoritma.

Kod smanjenja frekvencije osnovnog harmonika signala dolazi do smanjenja izračunate amplitude tog harmonika od strane algoritma iako je amplituda stvarnog signala ostala ista, ali se smanjila samo frekvencija signala (slika 15).



Slika 15. Rezultati LSQ IIR algoritma pri smanjenoj frekvenciji f_0 (45 Hz)

Figure 15. LSQ IIR algorithm results for decreased f_0 (45 Hz)



Slika 16. Rezultati LSQ IIR algoritma pri povećanoj frekvenciji f_0 (55 Hz)

Figure 16. LSQ IIR algorithm results for increased f_0 (55 Hz)

Sa smanjenjem frekvencije osnovnog harmonika prikaz amplitude tog harmonika, i ostalih harmonika čije amplitude računa algoritam, teži prema nuli.

Situacija je obratna pri porastu frekvencije signala osnovnog harmonika iznad nazivne, u ovom slučaju 50 Hz, slika 16. S povećanjem frekvencije povećava se i prikaz amplitude osnovnog i svih ostalih harmonika koje računa algoritam. Također se javlja alias prikaza DC komponente u obliku sinusnog signala frekvencije osnovnog harmonika.

6. Zaključak

Kao što je pokazano, LSQ algoritam s više varijabli čiji je temelj jednačba (1) u praktičnim je uvjetima potpuno neupotrebljiv zbog velike osjetljivosti algoritma i na najmanje odstupanje mjenenog signala od idealnog valnog oblika koji je predviđen jednačbom (1). Da bi se poboljšala točnost algoritma uvedeno je točku po točku filtriranje ulaznog signala pomoću nisko propusnog eliptičnog filtra. Dodavanjem nisko propusnog eliptičnog filtra i dodatnog RA filtra za filtriranje samih rezultata algoritma, došlo se do upotrebljivog algoritma koji točnije računa amplitude istosmjerne komponente, osnovnog, drugog i trećeg harmonika u svakoj iteraciji kontrolne petlje. Mana je to što se dodavanjem eliptičnog filtra povećalo ukupno kašnjenje algoritma.

Algoritam je osjetljiv na promjene frekvencije osnovnog harmonika u smislu da daje uvećan ili umanjen prikaz izračunatih amplituda pojedinih komponenti signala ovisno o tome da li frekvencija raste ili pada. Također se javlja i krivi prikaz amplitude istosmjerne komponente, koji se očituje u valnom obliku, koji je sinusni, i u samoj vrijednosti koja je veća od nule.

Algoritam ne treba čekati cijeli period signala kako bi zaključio kolika je amplituda signala kvara. Što je manji vremenski razmak između pojedinih točaka uzorkovanog signala, to je i vrijeme u kojem algoritam otkrije kvar manje. Pri tome treba paziti da su zadovoljeni uvjeti rada u realnom vremenu pošto algoritam radi s velikim brojem računskih operacija.

Kod nagle promjene amplitude mjenenog signala rezultati algoritma za pojedine komponente signala prate u potpunosti promjene amplitude signala bez bilo kakvih devijacija.

LITERATURA

- [1] HAVELKA, J.; MARUŠIĆ, A.; KUZLE, I.: *Multi-Variable Series Infinite Impulse Response Least Squares Algorithm*, IEEE AFRICON 2007, 26-28 Sept. 2007.
- [2] SACHDEV, M. S.; BARIBEAU, M. A.: *A new algorithm for digital impedance relays*, IEEE Transaction, PAS-98, (1979), 2232-2240.
- [3] REIMERT, D.: *Protective relaying for power systems*, Boca Raton, FL: CRC Press, (2006), ch. 5.
- [4] JOHNSON, T.; SALMAN, S. K.: *Digital protection for power systems*, London: Peter Peregrinus Ltd. on behalf of the IEE London UK, (1995), 100-102.
- [5] HAVELKA, J.: *Disturbance recognition in operation of synchronous generator using numerical algorithms*, Doctoral thesis, FER-ZVNE University of Zagreb, Zagreb, (2006), (in Croatian).
- [6] MITRA, S. K.; KAISER J. F. et.al.: *Handbook for digital signal processing*, New York: John Wiley & Sons, Inc., (1993), ch. 5.