

# Distantni relej baziran na primjeni simetričnih komponenti i Kalmanovog filtera

Vanja Bajić  
Elektrokrajina  
Banja Luka, Republika Srpska  
bavanja@yahoo.com

**Sadržaj** — U radu je izvršena analiza rada distantnog releja baziranog na primjeni sistema simetričnih komponenti strujnih i naponskih mjernih signala koji su određeni primjenom Kalmanovog filtera. Algoritam za realizaciju navedenog releja testiran je u Matlabu, primjenom strujnih i naponskih mjernih signala 400kV modela elektroenergetskog sistema, čija je simulacija rada izvršena primjenom programskog paketa ATPdraw. Dobijeni rezultati upoređeni su sa rezultatima dobijenim primjenom Furijeove metode za određivanje simetričnih komponenti.

**Ključne riječi** - Distantni relej 1; Simetrične komponente 2; Kalmanov filter 3;

## I. UVOD

Jedan od osnovnih alata koji se koristi za proračun struja i napona u elektroenergetskom sistemu (EES-u) za vrijeme trajanja kratkih spojeva je primjena sistema simetričnih komponenti. Sistem simetričnih komponenti primjenjuje se i u tehnici relejne zaštite, a u radu [4] izvedene su osnovne formule za realizaciju distantnog releja primjenom sistema simetričnih komponenti. Najčešće korištena metoda za određivanje simetričnih komponenti kod realizacije navedenog releja je Furijeova metoda. U ovom radu izvršena je analiza rada distantnog releja sa simetričnim komponentama, primjenom Kalmanovog filtera za određivanje simetričnih komponenti strujnih i naponskih mjernih signala. Testiranje algoritma izvršeno je u Matlabu, primjenom mjernih signala dobijenih simulacijom kvara koji je nastao na 400kV EES-u. Strujni i naponski mjerni signali dobijeni su simulacijom rada EES-a u programu ATPdraw. Takođe je izvršeno poređenje dobijenih rezultata sa rezultatima dobijenim primjenom Furijeove metode za određivanje simetričnih komponenti u datom releju.

## II. PRINCIP RADA DISTANTOG RELEJA BAZIRANOG NA PRIMJENI SIMETRIČNIH KOMPONENTI

Pretpostavimo da su  $(V_0, V_1, V_2)$  i  $(I_0, I_1, I_2)$  simetrične komponente, tj. nulta, direktna i inverzna komponenta strujnog i naponskog mjernog signala na mjestu ugradnje releja, respektivno. Ako sa  $(V_a, V_b, V_c)$  označimo fazne vrijednosti napona na mjestu ugradnje releja, tada se simetrične komponente napona određuju primjenom formule (1). Analogno se određuju simetrične komponente strujnih mjernih signala.

$$\begin{aligned} V_0 &= \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \\ V_1 &= \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \\ V_2 &= \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \\ a &= e^{j2\pi/3}, a^2 = e^{-j2\pi/3} \end{aligned} \quad (1)$$

Neka su  $(Z_0, Z_1)$  nulta i direktna komponenta impedanse cijelog voda koji se štiti. Primjenom naponskih i strujnih simetričnih komponenti, definisaćemo sljedeće relacije (2).

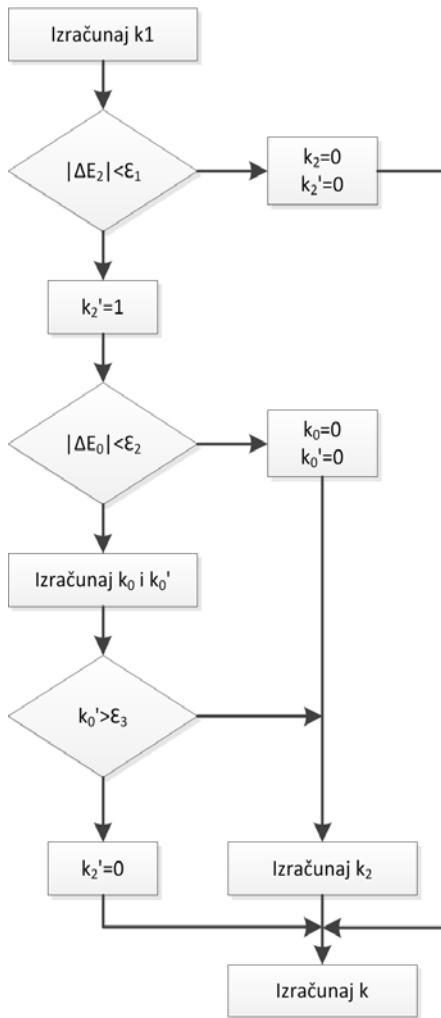
$$\begin{aligned} k_0 &= \frac{V_0}{Z_0 I_0} \\ k_1 &= \frac{V_1}{Z_1(I_1 - I_1')} \\ k_2 &= \frac{V_2}{Z_1 I_2} \\ k_0' &= \left| \frac{Z_0 I_0}{Z_1(I_1 - I_1')} \right| e^{j(\theta_0 - \theta_1)} \\ k_2' &= \begin{cases} 1, & |I_1| \approx |I_2| \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \\ k_1' &= \frac{Z_1 I_1'}{Z_1(I_1 - I_1')} \end{aligned} \quad (2)$$

U (2),  $I_1'$  predstavlja vrijednost struje direktne komponente prije nastanka kvara, a  $\theta_1$  i  $\theta_2$  su fazni uglovi nulte i direktne komponente impedanse voda, respektivno. Primjenom gore navedenih relacija može se izvesti formula (3), kojom se određuje udaljenost mjesta kvara na vodu od mjesta ugradnje zaštitnog releja, bez obzira koja se vrsta kvara desila u EES-u.

$$k = \frac{k_1 + k_2 k_2' + k_0 k_0'}{1 + k_0 + k_2 + k_1} \quad (3)$$

Vrijednost  $k$  određuje udaljenost mjesta kvara od mjesta gdje je ugrađen relej, u relativnim jedinicama.

Vrijednosti  $k_0$ ,  $k_0'$ ,  $k_2$  i  $k_2'$  određuju se u zavisnosti od vrste kratkog spoja, dok vrijednost  $k_1$  postoji za sve vrste kratkih spojeva. Ako su koeficijenti  $k_0$ ,  $k_0'$ ,  $k_2$  i  $k_2'$  jednaki ili približno jednaki nuli, tada se radi o trofaznom kratkom spoju. Ako je dvofazni kratak spoj bez zemlje, tada pored koeficijenta  $k_1$  postoje koeficijenti  $k_2$  i  $k_2'$ . Ako se desio dvofazni kratak spoj sa zemljom, tada su svi koeficijenti različiti od nule, osim koeficijenta  $k_2'$  koji je jednak nuli. Kod jednofaznog kratkog spoja svi koeficijenti su različiti od nule. Jedan od načina za određivanje gore navedenih koeficijenata prikazan je na slici 1, a detaljno objašnjenje može se naći u [5].



Slika 1. Blok dijagram za određivanje koeficijenata k

Prema [5], vrijednost  $\epsilon_1$  određuje se tako da je zadovoljen uslov  $\Delta E_2 > \epsilon_1 \Delta E_1$ . Posebno je potrebno obratiti pažnju na dvofazni kratak spoj sa zemljom, jer je za sve ostale nesimetrične kvarove zadovoljen uslov  $|\Delta E_1| = |\Delta E_2|$ . Pomoću  $\epsilon_2$  određuje se da li je kratak spoj sa zemljom ili bez, a određuje se analizom promjene  $|\Delta E_0|/|\Delta E_1|$  u funkciji  $Z_0/Z_1$ . Pomoću  $\epsilon_3$  određuje se da li je jednofazni ili dvofazni kvar sa zemljom, a može se odrediti iz relacije  $\epsilon_3 > (1+Z_0/Z_1)$ .

### III. KALMANOV FILTER

Kalmanov filter je rekurzivni matematički algoritam kojim se određuje procjena promjenjivih stanja nekog dinamičkog stohastičkog sistema na temelju zašumljenih i/ili nepotpunih mjerenja izlaznih promjenjivih sistema. Detaljna analiza primjene Kalmanovog filtera u tehnici relejne zaštite može se pogledati u [4] i [6]. U ovom dijelu definisat će se osnovne formule koje se primjenjuju za određivanje fazora strujnih i naponskih mjernih signala u tehnici relejne zaštite. Pretpostavimo da su nepoznati parametri mjernog signala (amplituda i faza osnovnog harmonika mjernog signala) slučajne promjenjive sa Rejljevom i uniformnom raspodjelom, respektivno. Tada za prostoperiodični mjerni signal vrijedi (4).

$$u(t) = V_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$$

$$u(t) = \cos(\omega_0 t) V_m \cos(\varphi) - \sin(\omega_0 t) V_m \sin(\varphi) \quad (4)$$

$$u(t) = x_1 \cos(\omega_0 t) - x_2 \sin(\omega_0 t)$$

Matematički model mjernog signala u prostoru stanja i mjerenja u diskretnim vremenskim trenucima dati su u (5).

$$x_{k+1} = \Phi_k x_k + w_k$$

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (5)$$

$\Phi_k$  – je matrica sistema,  $H_k$  je matrica koja daje idealnu vezu između mjernih veličina i vektora stanja, a  $w_k$  i  $v_k$  predstavljaju procesni i mjerni šum. Matrice kovarijansi za vektore  $w_k$  i  $v_k$  dati su u (6).

$$\overline{w_k w_i^T} = \begin{cases} Q_k, i=k \\ 0, i \neq k \end{cases}$$

$$\overline{v_k v_i^T} = \begin{cases} R_k, i=k \\ 0, i \neq k \end{cases} \quad (6)$$

$$\overline{w_k w_i^T} = 0, \forall k \neq i$$

Ako sa  $\hat{x}_k$  označimo stanje prije mjerenja, sa  $P_k$  odgovarajuću kovarijansu greške i sa  $K_k$  Kalmanovo pojačanje, tada su formule za rekurzivni Kalmanov filter date u (7).

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H_k \hat{x}_k^-)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^-$$

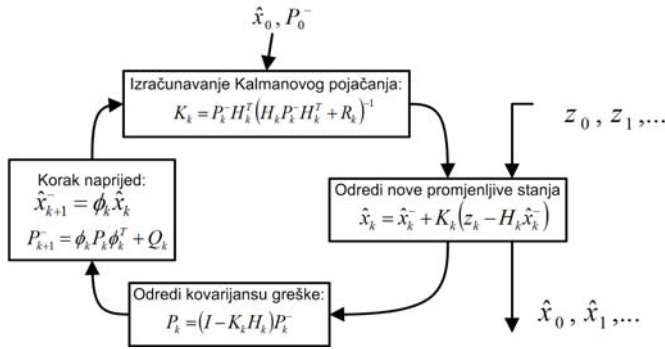
$$\hat{x}_{k+1}^- = \Phi_k \hat{x}_k$$

$$P_{k+1}^- = \Phi_k P_k \Phi_k^T + Q_k \quad (7)$$

Na slici 2, grafički je prikazana implementacija Kalmanovog filtera primjenom formula u (7).

U tehnici relejne zaštite, za određivanje parametara naponskog mjernog signala koristi se Kalmanov filter sa dvije promjenjive, dok se za određivanje parametara strujnog

mjernog signala koristi sa tri promjenjive, zbog eliminacije uticaja opadajuće jednosmjerne komponente.



Slika 2. Realizacija Kalmanovog filtera

Model Kalmanovog filtera sa dvije promjenjive, za određivanje parametara naponskog mjernog signala dat je sa formulama (8), (9) i (10).

Jednačina stanja:

$$\begin{bmatrix} x1_{k+1} \\ x2_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x1_k \\ x2_k \end{bmatrix} \quad (8)$$

Jednačina mjerenja:

$$z_k = \begin{bmatrix} \cos(\omega_0 k \Delta t) & -\sin(\omega_0 k \Delta t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x1_k \\ x2_k \end{bmatrix} + v_k \quad (9)$$

Početna matrica kovarijansi:

$$P_0^- = \begin{bmatrix} \sigma_v^2 & 0 \\ 0 & \sigma_v^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Model Kalmanovog filtera sa tri promjenjive, za određivanje parametara strujnog mjernog signala dat je sa formulama (11), (12) i (13).

Jednačina stanja:

$$\begin{bmatrix} x1_{k+1} \\ x2_{k+1} \\ x3_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\beta \Delta t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x1_k \\ x2_k \\ x3_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ w_k \end{bmatrix} \quad (11)$$

Jednačina mjerenja:

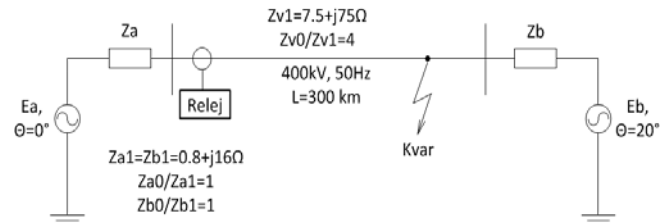
$$z_k = \begin{bmatrix} \cos(\omega_0 k \Delta t) & -\sin(\omega_0 k \Delta t) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x1_k \\ x2_k \\ x3_k \end{bmatrix} + v_k \quad (12)$$

Početna matrica kovarijansi:

$$P_0^- = \begin{bmatrix} \sigma_i^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_i^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_i^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

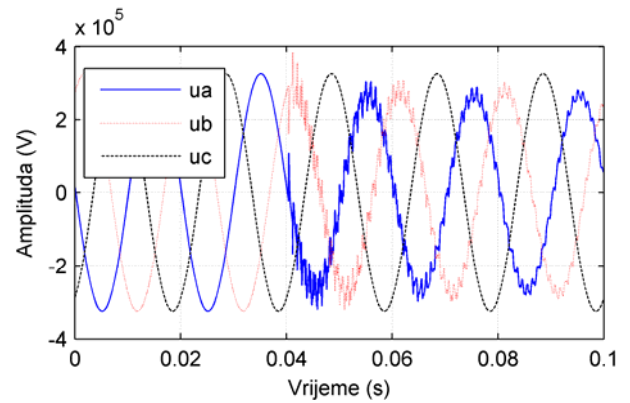
#### IV. TESTIRANJE ALGORITMA

Algoritam distantnog releja sa simetričnim komponentama i Kalmanovim filterom testiran je primjenom naponskih i strujnih signala, dobijenih simulacijom rada 400kV EES-a u programu ATPdraw. Na slici 3 prikazana je jednopolna šema ESS-a. Testiranje algoritma izvršeno je na dvofazni kratki spoj bez zemlje i jednofazni kratki spoj. Dvofazni kratki spoj simuliran je na udaljenosti od 220km od mjesta ugradnje zaštitnog releja, u trenutku od  $t=0.04s$ , a jednofazni kratak spoj na udaljenosti od 140km od mjesta ugradnje releja, takođe u trenutku  $t=0.04s$ .

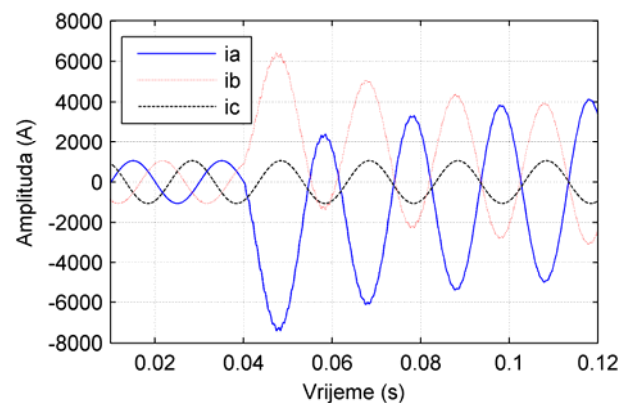


Slika 3. Jednopolna šema elektroenergetskog sistema

Grafici naponskih i strujnih signala EES-a sa slike 3, prije i poslije nastanka dvofaznog kratkog spoja bez zemlje ( $t=0.04s$ ), prikazani su na slikama 4 i 5, respektivno.



Slika 4. Grafik naponskog signala prije i poslije dvofaznog kratkog spoja



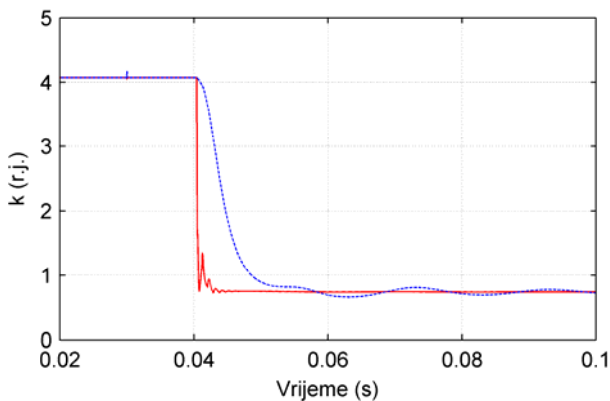
Slika 5. Grafik strujnog signala prije i poslije dvofaznog kratkog spoja

Na slici 6, prikazan je grafik promjenjive  $k$ , određen primjenom formule (3). Za vrijeme trajanja dvofaznog kratkog spoja bez zemlje, vrijednost  $k$  iznosi  $k \approx 0.733r.j.$ , što je

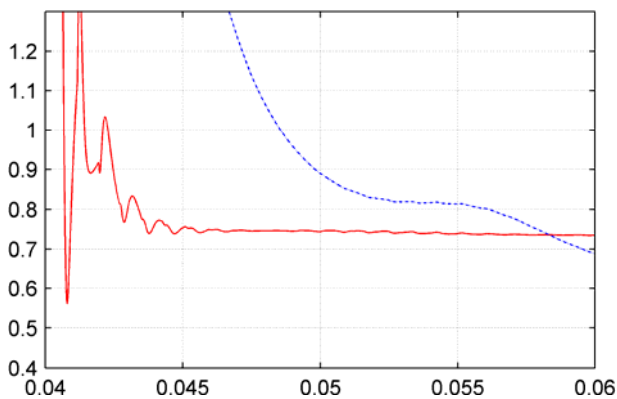
ekvivalentno 219.90km udaljenosti kvara od mjesta ugradnje zaštitnog releja.

U cilju poređenja algoritma distantnog releja baziranog na primjeni simetričnih komponenti koji koristi Furijeovu metodu i izvedenog algoritma sa Kalmanovim filterom, na istoj slici 6, crtkano je prikazana promjenjiva  $k$ , dobijena primjenom algoritma sa Furijeovom metodom za određivanje simetričnih komponenti mjernih signala. Sa slike 6, vidi se da je algoritam sa Kalmanovim filterom brži od Furijeove metode i da nije osjetljiv na opadajuću jednosmjernu komponentu, što nije slučaj kod Furijeove metode. Za pravilnu primjenu Furijeove metode u ovom algoritmu za distantni relej, potrebno je eliminisati uticaj opadajuće jednosmjerne komponente.

S obzirom da se promjenjiva  $k$ , u toku kvara kreće u intervalu od 0 do 1, na slici 7 prikazan je uvećani dio sa slike 6, u vremenskom intervalu od 0.04s do 0.06s. Na slici 7 vidi se razlika u konvergenciji između primjene Furijeove metode i Kalmanovog filtera.

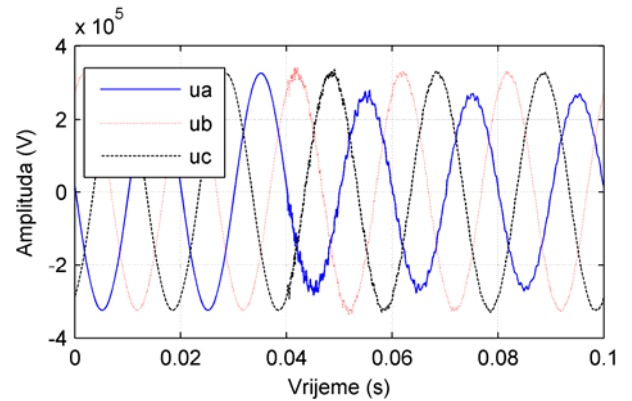


Slika 6. Promjenjiva  $k$  određena primjenom algoritma sa Kalmanovim filterom i Furijeovom metodom (crtkano)

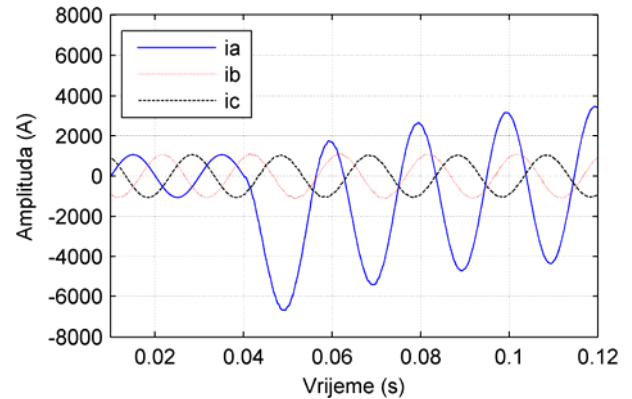


Slika 7. Uvećani dio slike 6 u vremenskom intervalu [0.04, 0.06]s

Na slikama 8 i 9 prikazani su grafici napona i struja, na mjestu ugradnje releja, prije i poslije jednofaznog kratkog spoja, koji je simuliran na udaljenosti od 140km od mjesta ugradnje releja, u trenutku od  $t=0.04s$ . Sa slike 9 vidi se uticaj opadajuće jednosmjerne komponente u fazi pogođenoj kvarom.

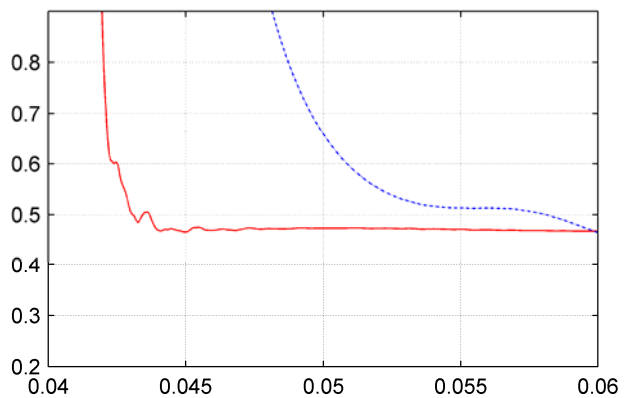


Slika 8. Grafik naponskog signala prije i poslije jednofaznog kratkog spoja



Slika 9. Grafik strujnog signala prije i poslije jednofaznog kratkog spoja

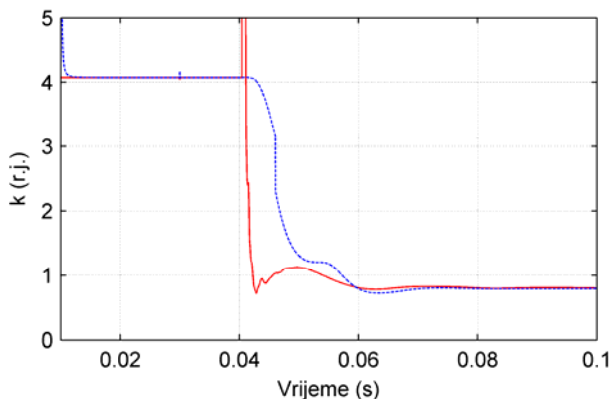
Na slici 10, prikazan je grafik promjenjive  $k$  određen primjenom formule (3). Za vrijeme trajanja jednofaznog kratkog spoja, vrijednost  $k$  iznosi  $k \approx 0.467r.j.$ , što je ekvivalentno 140.10km udaljenosti kvara od mjesta ugradnje zaštitnog releja.



Slika 10. Promjenjiva  $k$  određena primjenom algoritma sa Kalmanovim filterom i Furijeovom metodom (crtkano)

U prethodnim simulacijama dvofaznog kratkog spoja bez zemlje i jednofaznog kratkog spoja, impedansa kvara bila je jednaka nuli  $Z_f=0\Omega$ . Međutim, ukoliko se doda proizvoljna vrijednost impedanse na mjesto kvara, tada se neće dobiti tačna udaljenost kvara od mjesta ugradnje releja, jer u

algoritmu nije analiziran uticaj impedanse kvara na tačnost određivanja mjesta kvara. U [4] je pokazano na koji način se uzima u obzir i uticaj impedanse kvara na tačnost određivanja mjesta kvara. Na slici 11 prikazana je promjenjiva  $k$  za jednofazni kratki spoj sa impedansom kvara od  $Z_f=20\Omega$ .



Slika 11. Promjenjiva  $k$  pri jednofaznom kratkom spoju sa impedansom kvara od  $20\Omega$ , određena Kalmanovim filterom i Furijeovom metodom (crtkano)

Puna linija predstavlja promjenjivu  $k$  koja je određena algoritmom u kojem se simetrične komponente strujnih i naponskih mjernih signala određuju primjenom Kalmanovog filtera, a crtkana linija Furijeovom metodom. Sa slike 10, vidi se da kada kvar sadrži impedansu proizvoljne vrijednosti, brzina odziva je ista u oba slučaja. Razlog leži u velikom odstupanju između vrijednosti vremenske konstante EES-a u trenutku pojave jednofaznog kratkog spoja sa proizvoljnom impedansom i vrijednosti vremenske konstante koja je pretpostavljena u Kalmanovom filteru. Analogno vrijedi i za ostale vrste kratkog spoja koje se mogu pojaviti u EES-u.

#### V. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan kratak pregled principa rada distantnog releja baziranog na primjeni sistema simetričnih komponenti. Bitna osobina datog releja je ta što postoji samo jedna relacija (3), kojom se određuje udaljenost kvara od mjesta ugradnje releja, bez obzira koja se vrsta kvara desila na vodu. Za realizaciju algoritma navedenog releja, potrebno je odrediti simetrične komponente naponskog i strujnog mjernog signala. U ovom radu izvršena je analiza primjene Kalmanovog filtera za određivanje simetričnih komponenti mjernih signala i izvršeno je poređenje sa algoritmom u kojem se koristi

Furijeova metoda za određivanje simetričnih komponenti mjernih signala

Iz dobijenih rezultata vidi se da se primjenom Kalmanovog filtera dobija brži algoritam i da pravilno podešeni parametri u Kalmanovom filteru doprinose da nema uticaja opadajuće jednosmjerne komponente, dok primjenom Furijeove metode, mora se koristiti dodatna metoda za eliminaciju opadajuće jednosmjerne komponente koja se pojavljuje u strujnom mjernom signalu, što se vidi sa slike 6. Ukoliko postoji veliko odstupanje između vremenske konstante EES-a i pretpostavljene vremenske konstante u Kalmanovom filteru, tada nema razlike u brzini između primjene Kalmanovog filtera i Furijeove metode. Ovaj slučaj vidi se na slici 11.

#### LITERATURA

- [1] M. Đurić, "Ralajna zaštita", Beopres, Beograd, 2008.
- [2] M. Đurić, V. Terzija, Z. Radojević, Ž. Đurišić, Z. Stojanović, S. Zubić, V. Bajić, "Algoritmi za digitalne relejne zaštite", ETA, Beograd, 2012.
- [3] V. Bajić, M. Đurić, "Određivanje amplitude osnovnog harmonika signala primjenom Kalmanovog filtera za potrebe relejne zaštite", Elektrodistribucija, časopis za distribuciju električne energije, godina 38, avgust 2010, broj 1.
- [4] A. G. Phadke, M. Ibrahim, T. Hlibka, "Fundamental basis for distance relaying with symmetrical components", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, No. 2, March/April 1977.
- [5] A. G. Phadke, T. Hlibka, M. Ibrahim, M. G. Adamiak, "A microcomputer based symmetrical component distance relay", Power Industry Computer Application Conference, 1979.
- [6] Adly A. Girgis, R. G. Brown, "Application of Kalman filtering in computer relaying", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 7 July 1981.

#### ABSTRACT

This paper describes a brief review of the distance relay which is based upon the theory of symmetrical components. The symmetrical components are derived using the Kalman filtering. The obtained algorithm is tested in Matlab, using current and voltage signals of 400kV power system model, whose simulation is performed using the software ATPdraw. The result were compared with those obtained using Fourier methods for the determination of symmetrical components.

#### DISTANCE RELAY WITH SYMMETRICAL COMPONENTS USING THE KALMAN FILTERING

Vanja Bajić