



# ALGORITMI ZA SINHRONO UKLAPANJE REZERVNOG NAPAJANJA 6 KV SABIRNICA

Tomislav Gajić\*, Žarko Janda, Predrag Pejović

\*Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"

Elektrotehnički fakultet u Beogradu

**Sadržaj:** U radu su prikazani algoritmi za određivanje trenutka sinhronog uklapanja visokonaponskih prekidača, odgovarajući rezultati i diskutovana je mogućnost unpređenja algoritama. Za bezbedan rad termoelektrane potrebno je obezbediti besprekidno napajanje motornih sabirnica 6kV sa rezervnog izvora. Zbog postojanja zaostalog magnetnog polja u grupi asinhronih motora, prilikom isključenja napajanja na statoru svakog asinhronog motora i dalje postoji naizmenični napon. Kružna učestanost napona asinhronog motora jednaka je mehaničkoj kružnoj učestanosti vratila motora a amplituda opada približno po eksponencijalnom zakonu. Dat je detaljan prikaz algoritma za određivanje faznog stava između napona na motornim sabirnicama i napona na rezervnom vodu i za merenje frekvencija napona na motornim sabirnicama i na rezervnom vodu, implementirani u uređaju za sinhrono prevođenje sabirnica na rezervno napajanje (AUR).

**Ključne reči:** uklop rezervnog napajanja, motorne sabirnice, visokonaponski prekidač

## 1. UVOD

Za bezbedan rad termoelektrane potrebno je obezbediti besprekidno napajanje motornih sabirnica 6kV, koje se obezbeđuje dovođenjem još jednog voda koji se koristi kao rezervni. Sabirnice 6kV napajaju sve glavne elektromotorne pogone u termoelektrani. Prilikom gubitka napona na glavnom vodu (iz bilo kog razloga) potrebno je obezbediti sinhrono prebacivanje napajanja motora na rezervni vod [1,2,3].

Zbog postojanja zaostalog magnetnog polja u samom asinhronom motoru, prilikom isključenja napajanja na statoru asinhronog motora i dalje postoji naizmenični napon. Kružna učestanost napona na statoru asinhronog motora jednaka je mehaničkoj kružnoj učestanosti vratila motora a amplituda napona opada približno po eksponencijalnom zakonu, slika 1. U kratkom vremenskom intervalu može se smatrati da je moment koji deluje na vratilo motora konstantan pa vratilo usporava konstantnim ubrzanjem, samim tim se frekvencija napona na statoru linearno menja. Za to vreme rezervni vod je neopterećen i kužna učestanost je konstantna i jednaka kružnoj učestanosti mrežnog

napona. Usled ove razlike učestanosti dolazi do fazne razlike između mrežnog napona i napona na sabirnicama motora. Ako bi se priključio mrežni napon na sabirnice motora, u trenutku kada je fazni ugao između napona na sabirnicama motora i mrežnog napona veliki (npr. blizak 180°) došlo bi do strujnog udara. Pik struje može da bude između 18 i 20 puta veći od nominalne struje motora.

Da bi se obezbedilo korektno priključenje rezervnog napajanja, napon na sabirnicama motora i mrežni napon moraju biti sinhronizovani, odnosno mora biti mala fazna razlika napona u trenutku priključenja.

## 2. NAČINI RADA UREĐAJA AUR

Uređaj AUR je predviđen za dve vrste prebacivanja napajanja motornih sabirnica:

1) kada je napajanje ispravno ali se želi promeniti vod sa kog se motori napajaju npr. zbog remonta. Ovakvo prebacivanje se naziva manuelno prebacivanje.

2) Kada se detektuje kvar napajanja i ovakvo prebacivanje se naziva automatsko prebacivanje (po dejstvu zaštite).

Uređaj AUR se može konfigurisati u dva moda manuelnog prebacivanja:

- 1) paralelno manuelno prebacivanje,
- 2) sekvencijalno manuelno prebacivanje.

Motiv za uvođenje dva moda manuelnog prebacivanja je inertnost 6kV prekidača i značajna razlika u trajanju vremena uključenja i isključenja prekidača. Uključenje prekidača traje otprilike 100 do 140 ms dok isključenje traje otprilike 60 do 80 ms, uzimajući u obzir i kašnjenje komandi u relejnom nizu. Ova razlika može da dovede do kratkotrajnog gubitka napajanja, koji je u nekim sistemima nedopustiv.

Da bi se smanjila vremenska pauza prilikom paralelnog prebacivanja prvo se zadaje komanda za uključenje prekidača, dok se komanda za isključenje zadaje sa kašnjenjem. Kašnjenje se može softverski podešavati kao sistemski parametar.

Sekvencijalno prebacivanje potpuno eliminiše problem gubitka napajanja. Kada je AUR u ovom modu rada, prvo se zadaje komanda za uključenje prekidača, pa se sačeka potvrda da je uključenje izvršeno. Onda se čeka da istekne vreme preklapanja, koje je takođe zadato

kao sistemski parametar. Kada su oba voda priključena, onda se zadaje komanda za isključenje prekidača. Može biti izabran samo jedan mod manualnog prebacivanja.

AUR podržava 4 moda automatsko prebacivanja:

- 1) brzo prebacivanje,
- 2) prebacivanje pri prvoj faznoj koincidenciji,
- 3) prebacivanje po rezidualnom naponu,
- 4) prebacivanje po isteku dugog vremena.

Sva četiri moda mogu biti dozvoljena ili zabranjena nezavisno jedan od drugog. Sistem se aktivira kada okruženje signalizira kvar napajanja ili kada amplituda napona na motornim sabirnicama padne ispod definisane vrednosti.

Brzo prebacivanje se dešava ako se odmah po detekciji kvara ustanovi da su fazna i frekvencijska razlika između napona na rezervnom vodu i napona na motornim sabirnicama ispod određenog praga.

Ako se nije desilo brzo prebacivanje, pošto postoji frekvencijska razlika, fazna razlika će se povećavati sa kvadratom vremena (frekvencija se menja linearno) i posle nekog vremena ponovo će naponi biti u fazi (desiće se prva fazna koincidencija). Situacija u ovakvom modu rada je nešto komplikovanija nego kod brzog prebacivanja, razlika frekvencija je značajna, a kašnjenja prekidača ogromna (reda 60 do 80 ms), pa se signal za prebacivanje mora zadati ranije, odnosno mora se vršiti predikcija.

Ako se nije desilo prebacivanje u prva dva moda, a amplituda napona je pala ispod određene granice, sistem će dati naredbu za prebacivanje bez obzira na fazne stavove. Ovakva reakcija sistema se naziva prebacivanje po rezidualnom naponu.

Ako je detektovan kvar, a nije se desila nikakva reakcija sistema, posle određenog vremena sistem daje komandu za prebacivanje. Takav režim rada se naziva prebacivanje po isteku dugog vremena.

Sa operatorskog panela moguće je: menjati sistemske parametre (pragove napona, faznih i frekvencijskih razlika), parametre okruženja (vremena kašnjenja prekidača, vremena detekcije otkaza prekidača...) kao i izbor modova rada sa kojima će uređaj raditi.

### 3. PRELAZNI PROCES ASINHRONOG MOTORA

Za uklop rezervnog napajanja od interesa je ponašanje motora po prekidu napajanja. Pošto je motor jednostrano napajana mašina prekid napajanja se kvantitativno opsuje dodeljivanjem nulte vrednosti samo statorskim strujama.

Ako se iskorosti činjenica da su sve statorske struje jednake nuli, a  $d$ - $q$  koordinatni sistem odabere tako da u početnom trenutku postoji struja samo u rotorskim virtuelnim namotajima  $d$ , i ako se za kružnu učestanost obrtanja  $d$ - $q$  koordinatnog sistema u odnosu na stator odabere mehanička brzina obrtanja rotora, jednačine [4] se značajno pojednostavljaju i dobijaju sledeći oblik

$$\begin{aligned} u_{ds} &= \frac{d\Psi_{ds}}{dt} - \omega_s \Psi_{qs} \\ u_{qs} &= \frac{d\Psi_{qs}}{dt} + \omega_s \Psi_{ds} \\ 0 &= R_r i_{dr} + \frac{d\Psi_{dr}}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

$$0 = R_r i_{qr} + \frac{d\Psi_{qr}}{dt}$$

Ako izrazimo flukseve preko struja dobijamo

$$\Psi_{dr} = L_R i_{dr} \quad (2)$$

$$\Psi_{qr} = L_R i_{qr}$$

Jednačine naponske ravnoteže na virtuelnim rotorskim namotajima imaju isti oblik, pa ćemo rešavati samo jednu, jer druga se rešava analogno. Posle izražavanja flukseva preko struja u jednačinama naponske ravnoteže dobija se

$$L_R \frac{di_{dr}}{dt} + R_r i_{dr} = 0 \quad (3)$$

iz koje se direktno dobija jednačina

$$\frac{di_{dr}}{dt} + \frac{R_r}{L_R} i_{dr} = 0 \quad (4)$$

koja se rešava smenom  $ke^{\lambda t} = i_{dr}$ . Rešnje jednačine je

$$i_{dr} = ke^{-\frac{R_r}{L_R} t} \quad (5)$$

Ako se uzme u obzir početni uslov da je  $i_{dr}(0) = I_{dr0}$  može se odrediti i konstanta  $k$   $ke^{-\frac{R_r}{L_R} 0} = I_{dr0} \Rightarrow k = I_{dr0}$  odakle dobijamo konačan

izraz za  $i_{dr}$ .  $i_{dr}(t) = I_{dr0} e^{-\frac{R_r}{L_R} t}$ , ako još uvedemo da je vremenska konstanta rotora  $T_R = \frac{L_R}{R_r}$  dobijamo da je

$i_{dr}(t) = I_{dr0} e^{-\frac{t}{T_R}}$ . Sličnim izvođenjem dobija se da je

$i_{qr}(t) = I_{qr0} e^{-\frac{t}{T_R}}$ , ali pošto je položaj osa tako odabran da  $I_{qr}$  u početnom trenutku bude nula dobija se da je  $i_{qr}(t) = 0$ . Kada se preko ovih vrednosti izraze fluksevi kroz statorske virtuelne namotaje dobija se

$$\begin{aligned} \Psi_{ds} &= M I_{dr0} e^{-\frac{t}{T_R}} \\ \Psi_{qs} &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

zamenom ovih vrednosti u polaznu jednačinu dobijaju se naponi na krajevima virtuelnih statorskih namotaja

$$u_{ds} = \frac{d\Psi_{ds}}{dt} = -\frac{M I_{dr0}}{T_R} e^{-\frac{t}{T_R}} = -\frac{\Psi_{ds0}}{T_R} e^{-\frac{t}{T_R}} \quad (7)$$

$$u_{qs} = \omega M I_{dr0} e^{-\frac{t}{T_R}} = \omega \Psi_{ds0} e^{-\frac{t}{T_R}}$$

Dobijene rezultate možemo da interpretiramo kao prostorni vektor statorskih napona[4] čija se amplituda menja po zakonu

$$U_S = \sqrt{u_{ds}^2 + u_{qs}^2} = \Psi_{ds0} e^{-\frac{t}{T_R}} \sqrt{\frac{1}{T_R^2} + \omega^2}, \quad (8)$$

a u odnosu na stator rotira kružnom učestanošću kojom se mehanički obrće vratilo motora, odnosno rotor.

Kružnu učestanost vratila asinhronog motora nalazimo iz Njutnove jednačine

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = M_{em} - \sum M_{opt}. \text{ U slučaju kada su}$$

statorske struje jednake nuli elektro-magnetni moment je jednak nuli i jednačina dobija oblik

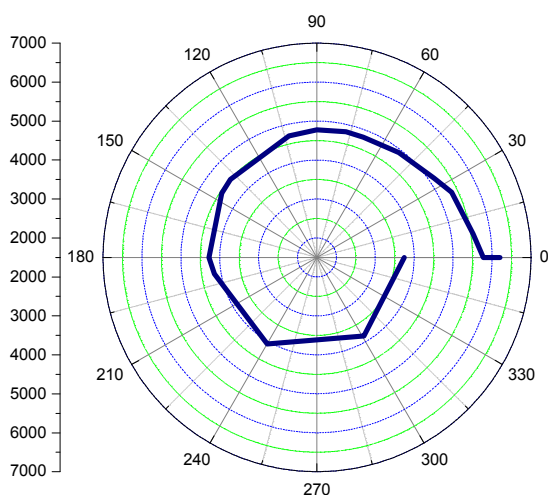
$$J \frac{d\omega_r}{dt} = -\sum M_{opt}. \text{ Ako se pretpostavi da je u}$$

kratkom vremenskom intervalu, koji je nama od interesa, moment opterećenja konstantan, može se zaključiti da frekvencija napona na statorskim namotajima linearno

opada po zakonu  $\frac{d\omega}{dt} = K$ . Poslednja jednačina

pretstavlja model ponašanja fazne i frekvencijske razlike između mrežnog napona i napona na sabirnicama motora.

U trenutku isključenja napajanja asinhronog motora dolazi od trenutne promene faze i frekvencije napona statorskih namotaja, koja je izazvana razlikom u brzini obrtanja vektora fluksa i vratila asinhronog motora.



Sl. 1. *Spiralni dijagram fazora napona motornih sabirnica 6kV pri gašenju polja motora – TENTA*

#### 4. ALGORITMI ZA ODREĐIVANJE RELEVANTNIH VELIČINA

Iz prethodnog izlaganja se vidi da je za bezbedno prevođenje napajanja motornih sabirnica od interesa odrediti faznu i frekvencijsku razliku između napona motornih sabirnica i napona rezervnog voda kao i razliku amplituda ova dva napona. Frekvencijska i fazna razlika

se određuju detektovanjem prolaska kroz nulu odgovarajućih sinusnih signala. Sinusni signal se poredi sa nulom pomoću komparatora i tako dobijen izlazni signal se dalje digitalno obrađuje. Meranjem trajanja pozitivne poluperiode se određuje frekvencija oba napona. Apsolutna vrednost fazne razlike se određuje trajanjem signala koji se dobija kao ekskluzivna disjunkcija signala dobijenih iz komparatora, dok se znak određuje korišćenjem D flip-flopa. Signal iz prvog komparatora (npr. napona rezervnog voda) se vodi na D-ulaz D flip-flopa, a signal iz drugog komparatora (npr. napona motornih sabirnica) se vodi na clk-ulaz D flip-flopa. Izlaz D flip-flopa će biti 0 ako prednjači napon na motornim sabirnicama odnosno 1 kao prednjači napon rezervnog voda.

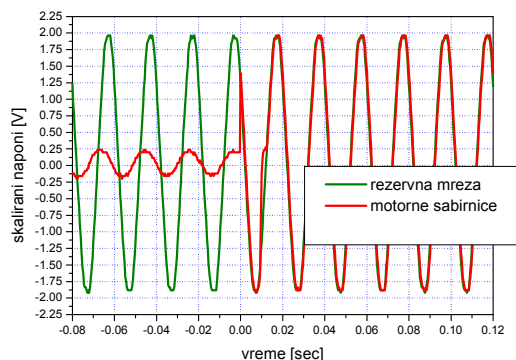
Po dobijanju naloga za prevođenje napajanja motornih sabirnica po signalu zaštite proverava se fazni stav i razlika frekvencija napona sabirnica i napona rezervnog voda. Ako su ispunjeni uslovi tj, ako su fazni stav i razlika frekvencija u zadatim granicama izdaje se komanda prekidačima, u suprotnom čeka se prva fazna koincidencija. U slučaju prevođenja napajanja sabirnica u prvoj faznoj koincidenciji, vreme kašnjenja prekidača nije zanemarivo, jer frekvencija zaostalog napona na sabirnicama značajno odstupa od frekvencije napona rezervnog izvora i mora se uzeti u obzir prilikom određivanja trenutka izdavanja komande prekidačima. Pored frekvencija i faznog stava potrebno je izračunati i konstantu sistema motornih sabirnica.

Konstanta sistema motornih sabirnica K (izvod promene frekvencije) se određuje oduzimanjem frekvencije napona motornih sabirnica od frekvencije napona rezervnog voda i množenjem sa frekvencijom rezervnog voda (deljenjem sa periodom). Sledećim izrazom se dobija fazna razlika između napona u trenutku zatvaranja prekidača:

$$\left| \Delta\Theta_0 - \Delta f_0 \cdot T_d - \frac{K}{2} T_d^2 \right| \leq \Delta\Theta_{dozvoljeno}, \quad (9)$$

gde je  $\Delta\Theta_0$  početna vrednost električnog ugla između fazora napona,  $\Delta f_0$  je početna vrednost razlike frekvencija,  $T_d$  je ukupno vreme kašnjenja uklapanja prekidača a  $\Delta\Theta_{dozvoljeno}$  je fazna razlika pri kojoj je dozvoljeno prevođenje napajanja sabirnica (u trenutku uklapanja prekidača).

Zbog ograničenja korišćene platforme [5] izračunavanje parametara se vrši pri tranziciji signala sa 1 na 0 izlaza komparatora napona rezervnog voda i nule (frekvencija 50Hz), i ako je fazna razlika zadovoljavajuća dozvoljava se prebacivanje.



Sl. 2. Prebacivanje u trenutku prve fazne koincidencije.

Korišćenjem dodatnih mikrokontrolera moguće je izračunavanje svih potrebnih parametara posle svake tranzicije (i sa 1 na 0 i sa 0 na 1) na oba signala (i signala napona motornih sabirnica i signala napona rezervnog voda). Tako se postiže frekvencija izračunavanja od 200Hz. Pored toga ako se koriste kontroleri sa velikim brojem tajmera, pri prebacivanju u prvoj faznoj koincidenciji se može uvesti zadržka signala prebacivanja tako da uklapanje bude preciznije. Umesto ranije pomenutog izraza može se koristiti:

$$\Delta\Theta_0 - \Delta f_0 \tau - \frac{K}{2} \tau^2 = 0, \quad (10)$$

gde je  $\tau$  vreme potrebno da se fazori ponovo poklope. Rešenje jednačine je:

$$\tau_{1,2} = -\frac{\Delta f_0}{K} \pm \sqrt{\frac{\Delta f_0^2}{K^2} + \frac{2\Delta\Theta_0}{K}}. \quad (11)$$

Fizički smisao ima jedino rešenje sa znakom „+”. Kada se izračuna  $\tau$  direktno se iz izraza  $T_x = \tau - T_d$  dobija  $T_x$  tj. vreme zadržke naloga za prebacivanje sabirnica. Ovo vreme ima smisla koristiti jedino ako je manje od 10 ms, jer će u suprotnom biti preciznije izračunato u narednoj iteraciji.

## 5. ZAKLJUČAK

Razvijen je uređaj i uprošćeni algoritam za brzo prebacivanje motornih sabirnica 6 kV na rezervno napajanje, kao i odgovarajući hardver za brzo kondicioniranje signala. Prikazani algoritam je uspešno implementiran na industrijskom PLC automatu. Analizirana je mogućnost unapređenja prikazanog algoritma.

## 6. REFERENCE

- [1] W. Von Groenewald, W. Brackmann, „*Automatische Schnellumschaltung mit einem neuen, elektronischen Phasenvergleichsgeraet*“, BBC 1965.
- [2] „*High-Speed Busbar Transfer System Type AUE2*“ v4.2 Operation Manual, Siemens, 2005.
- [3] „*High Speed Transfer Device SUE 3000*“, Operating manual 1HDK400072 EN; Rev. C Kr, ABB, Juli 2005
- [4] Vladan Vučković, „*Električni pogoni*“, Beograd, Zavod za grafičku delatnost Tehnološko-metalurškog fakulteta, 1997
- [5] „*W340E109\_CS\_CJ\_CPU\_Reference\_Manual*“, OMRON, 2003.

## THE SYNCHRONOUS HIGH SPEED TRANSFER ALGORITHMS OF MEDIUM VOLTAGE MOTOR BUS

**Abstract:** *In the paper the high speed motor bus transfer calculation algorithms are presented. The purpose of the presented algorithms is to achieve in phase circuit breakers commutation between main and auxiliary voltage power supply, taking into account the variable time delays of circuit breakers during turn on and turn off. Due to existence of the residual magnetic field within induction motors, connected to the motor bus, there is the stator voltage decay phenomenon. The detailed description of the algorithm implemented on a industrial grade PLC is presented as well as the experimental results. The possibility of algorithm improvements is discussed at last.*

**Key words:** *High speed transfer, motor bus, medium voltage circuit breaker*