

RAZVOJ I REALIZACIJA ALGORITAMA I UREĐAJA ZA AUTOMATSKO PREBACIVANJE NAPAJANJA SABIRNICA 6kV NA REZERVNO NAPAJANJE

Tomislav Gajić, Žarko Janda, Mladen Milošević, Dušan Arnautović
Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“ Beograd

Kratak sadržaj: U radu je prikazana realizacija, osnovna namena i režimi rada uređaja za automatsko sinhrono prebacivanje napajanja motornih 6kV sabirnica na rezervno napajanje (AUR-a). Prikazani su algoritmi za određivanje trenutka sinhronog uklapanja visokonaponskih prekidača, odgovarajući rezultati i diskutovana je mogućnost unapređenja algoritama. Izveden je model motornih sabirnica u režimu gašenja polja na osnovu modela potrošača (grupe asinhronih motora). Prikazana su četiri osnovna moda rada (brzo prebacivanje, prebacivanje pri prvoj faznoj koincidenciji, po rezidualnom naponu i po isteku zadatog vremena) i redukovani model motornih sabirnica prvog reda. Eksperimentalni rezultati, snimljeni na realnim motornim sabirnicama 6kV u termoelektrani su potvrdili uprošćene teorijske analize i opravdali konstruktivno projektantski pristup ovakvom uređaju.

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 dovodenjem 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. Pri direktnom priključenju mrežnog napona na motorne sabirnice moglo bi da dođe do strujnog udara usled fazne neusaglašenosti motornog i mrežnog napona. 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 (manja od desetak stepeni).

2. KRATAK OPIS ZADATAKA I DOSADAŠNJA REŠENJA

Funkcije koje treba da obavlja uređaj za automatsku sinhronizaciju rezervnog napajanja su: detekcija gubitka napajanja na motornim sabirnicama i realizacija sinhronizovanog priključenja rezervnog napajanja.

Iz modela asinhronog motora u d-q koordinatnom sistemu [4], izjednačavanjem statorskih struja sa nulama, što odgovara gubitku napajanja, i pogodnim izborom osa, lako se dobija da se amplituda napona na statorskim namotajima menja po zakonu:

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

gde je:

T_R - vremenska konstanta rotora

Propad napona na statorskim namotajima je indikator da su motori izgubili napajanje i da uređaj treba da izvrši sinhronizovanu zamenu voda sa koga se napajaju sabirnice motora.

Kružna učestanost napona na statoru asinhronog motora koji je ostao bez napajanja se menja po zakonu

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{-\sum M_{opt}}{J}, \quad (2)$$

ako se pretpostavi da je moment opterećenja konstantan u vremenskom intervalu od interesa, u kome se uzima da je ubrzanje zaustavljanja konstantno, dobija se da se frekvencija linearno menja tj.

$$\frac{d\omega}{dt} = K \quad (3)$$

Poslednja jednačina predstavlja model ponašanja fazne i frekvencijske razlike između mrežnog napona i napona na sabirnicama motora.

Problem sinhronne promene napajanja sabirnica motora na početku je rešavan u analognoj tehnici. U EPS-ovim termoelektranama najzastupljeni je upravo analogni uređaj, proizvodnje BBC [1]. Ovaj uređaj jednostavno oduzima dva sinusoidna signala. Kao rezultat dobija se signal na dvostukoj učestanosti čija je obvojnica, kada su signali bliskih amplituda proporcionalna faznoj razlici dva signala. Nedostatak ovakvog rešenja je što se sinhrono prebacivanje može obaviti samo ako se propad napona detektuje dovoljno brzo. Nemoguće je pouzdano detektovati prvu ili drugu faznu koincidenciju sa takvom obradom signala.

Danas se na tržištu mogu naći digitalne verzije uređaja za sinhrono uklapanje napajanja na sabirnicama motor, na primer ABB-ov High Speed Transfer Device SUE 3000 ili Simensov High-Speed Busbar Transfer System Type AUE2 v4.2. [2,3].

U okviru projekta remonta termoelektrane „Kostolac B“ u Drmnu i „Nikola Tesla A“ u Obrenovcu, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" je razvio svoju verziju uređaja za sinhronu promenu izvora napajanja motornih sabirnica, odnosno Automatski Uklap Rezerve (AUR) [6].

Karakteristike napona motornih sabirnica na blokovima TENT- A pri gašenju polja motora prikazane su na slikama 1, 2 i 3. Kako se može videti sa pomenutih slika, polje se kod velikih asinhronih motora dosta dugo gasi, za razliku od malih asinhronih motora.

3. PRELAZNI PROCES ASINHRONOG MOTORA

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

Ako se iskoristi 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

$$\begin{aligned} u_{ds} &= \frac{d\Psi_{ds}}{dt} - \omega_s \Psi_{qs} \\ u_{qs} &= \frac{d\Psi_{qs}}{dt} + \omega_s \Psi_{ds} \\ 0 &= R_r i_{dr} + \frac{d\Psi_{dr}}{dt} \\ 0 &= R_r i_{qr} + \frac{d\Psi_{qr}}{dt} \end{aligned} \quad (4)$$

Ako izrazimo flukseve preko struja dobijamo izraze

$$\begin{aligned} \Psi_{dr} &= L_R i_{dr} \\ \Psi_{qr} &= L_R i_{qr} \end{aligned} \quad (5)$$

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

$$L_R \frac{di_{dr}}{dt} + R_r i_{dr} = 0 \quad (6)$$

iz koje se direktno dobija jednačina

$$\frac{di_{dr}}{dt} + \frac{R_R}{L_R} i_{dr} = 0 \quad , \quad (7)$$

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

$$i_{dr} = ke^{-\frac{R_R}{L_R}t} \quad . \quad (8)$$

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

$$\begin{aligned} \Psi_{ds} &= MI_{dr0}e^{-\frac{t}{T_R}} \\ \Psi_{qs} &= 0 \end{aligned} \quad , \quad (9)$$

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

$$\begin{aligned} u_{ds} &= \frac{d\Psi_{ds}}{dt} = -\frac{MI_{dr0}e^{-\frac{t}{T_R}}}{T_R} = -\frac{\Psi_{ds0}e^{-\frac{t}{T_R}}}{T_R} \quad , \\ u_{qs} &= \omega MI_{dr0}e^{-\frac{t}{T_R}} = \omega\Psi_{ds0}e^{-\frac{t}{T_R}} \end{aligned} \quad (10)$$

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

$$U_S = \sqrt{u_{ds}^2 + u_{qs}^2} = \Psi_{ds0}e^{-\frac{t}{T_R}} \sqrt{\frac{1}{T_R^2} + \omega^2} \quad , \quad (11)$$

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

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = M_{em} - \sum M_{opt}$$

. U slučaju kada su statorske struje jednake nuli elektro-

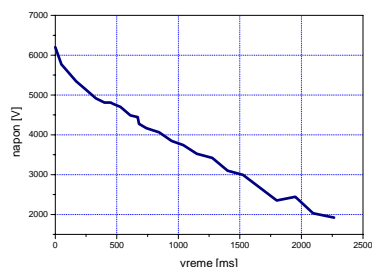
$$J \frac{d\omega_r}{dt} = -\sum M_{opt}$$

magnetni moment je jednak nuli i jednačina dobija oblik . 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

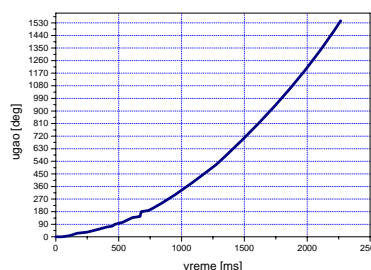
$$\frac{d\omega}{dt} = K$$

namotajima linearno opada po zakonu . Poslednja jednačina predstavlja model ponašanja fazne i frekvencijske razlike između mrežnog napona i napona na sabirnicama motora.

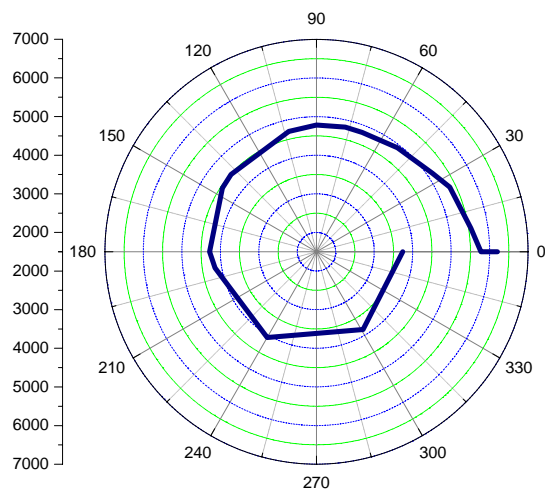
U trenutku isključenja napajanja asinhronog motora dolazi od trenutne promene faze i frekvencije napona statorskih namotaja, koja je izazvana razlikom u brzini obrtanja vektora fluksa i vratila asinhronog motora. Realni snimci sa objekta su prikazani na slikama 1, 2 i 3



Slika 1. Promena napona motornih sabirnica 6 kV pri gašenju polja motora – TENT A, raniji eksperimentalni snimak



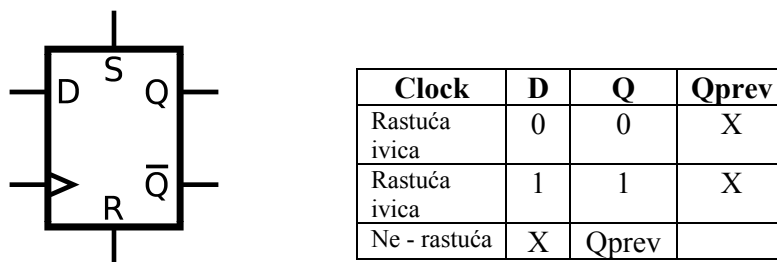
Slika 2. Promena faznog ugla napona motornih sabirnica 6 kV pri gašenju polja motora – TENT A, raniji eksperimentalni snimak



Slika 3. Spiralni dijagram fazora napona motornih sabirnica 6kV pri gašenju polja motora – TENT A, raniji eksperimentalni snimak

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. Merenjem 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, kao što je prikazano na slici 4.



Slika. 4. D flip – flop i određivanje znaka fazne razlike.

Po dobijanju naloga za prevođenje napajanja motornih sabirnica po signalu zaštite proverava se fazni stav i razlika frekvencija napona sabirnica i napona rezervnog voda.

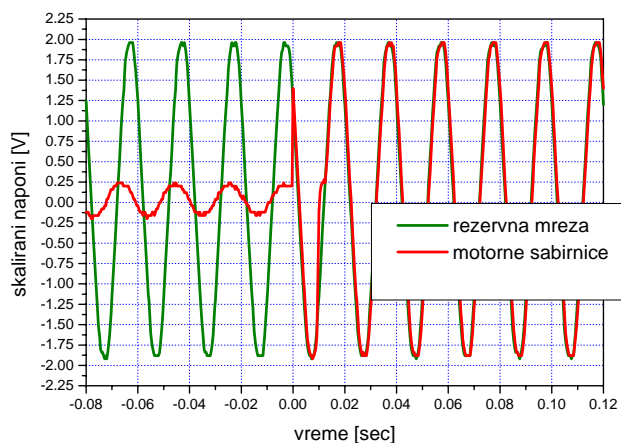
Ako su ispunjeni uslovi tj, ako su fazni stav i razlika frekvencija u zadatim granicama izdaje se komanda prekidačima, u suprotnom čeka se prva fazna koincidencija. U slučaju prevođenja napajanja sabirnica u prvoj faznoj koincidenciji, vreme kašnjenja prekidača nije zanemarivo, jer frekvencija zaostalog 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:

$$\left| \Delta\Theta_0 - \Delta f_0 \cdot T_d - \frac{K}{2} T_d^2 \right| \leq \Delta\Theta_{\text{dozvoljeno}} \quad (12)$$

gde je $\Delta\Theta_0$ početna vrednost električnog ugla između fazora napona, Δf_0 je početna vrednost razlike frekvencija, T_d je ukupno vreme kašnjenja uklapanja prekidača a $\Delta\Theta_{\text{dozvoljeno}}$ 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.



Slika 5. 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 izraz (13):

$$\Delta\Theta_0 - \Delta f_0 \tau - \frac{K}{2} \tau^2 = 0 \quad (13)$$

gde je τ vreme potrebno da se fazori ponovo poklope. Rešenje jednačine je (14):

$$\tau_{12} = -\frac{\Delta f_0}{K} \pm \sqrt{\frac{\Delta f_0^2}{K^2} + \frac{2\Delta\Theta_0}{K}} \quad (14)$$

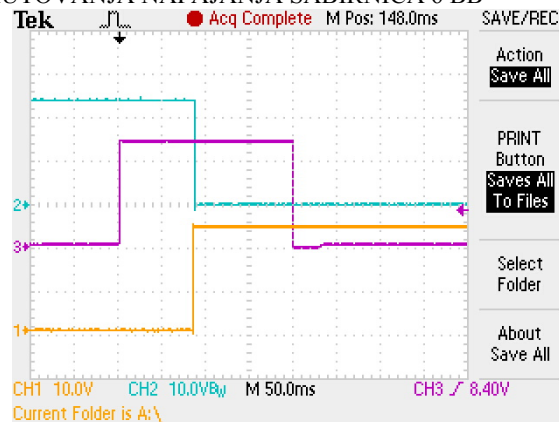
Fizički smisao ima jedino rešenje sa znakom „+”. Kada se izračuna τ direktno se iz izraza $T_x = \tau - T_d$ dobija T_x tj. vreme zadržke naloga za prebacivanje sabirnica. Ovo vreme ima smisla koristiti jedino ako je manje od 10 ms, jer će u suprotnom biti preciznije izračunato u narednoj iteraciji (odnosno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

5. TESTIRANJE NA REALNIM MOTORNIM SABIRNICAMA 6KV

Prvo uspešno puštanje u pogon uređaja tipa AUR je obavljeno na bloku B1 TE „Kostolac B“ 23.09.2008. Specifičnost instalacije je da je za komandni napon upotrebljen naizmenični napon 220 V 50 Hz obezbeđen sa sistema za besprekдно napajanje bloka B1. Druga uspešna instalacija ovog tipa uređaja je obavljena na bloku A6 TE „Nikola Tesla A“, gde je za komandni napon upotrebljen jednosmerni napon 110 V. Na objektu TE „Nikola Tesla A“ 22.11.08 se počelo sa probama komutovanja motornih 6 kV sabirnica, koje su bile opterećene sa motornim teretom od 2MW. Manuelni režim prebacivanja je podešen na paralelni mod i vreme zadržke je podešeno na 10 ms, preko operatorskog panela.

Izvršeno je manuelno prebacivanje napajanja motornih sabirnica sa rezervnog na glavno napajanje, a zatim je izvršeno komutovanje nazad na glavno napajanje. Na slici 6 se vide tragovi komande AUR-u i tragovi koji odgovaraju pomoćnim kontaktima prekidača,

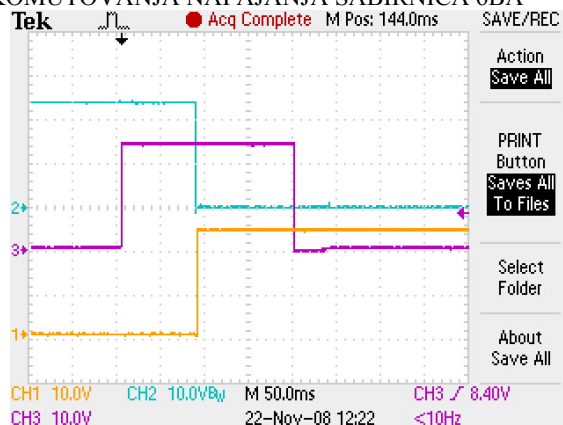
PROBA KOMUTOVANJA NAPAJANJA SABIRNICA 6 BB



Slika 6. Tragovi signala tokom prevođenja motornih sabirnica 6 BB sa rezervnog na glavno napajanje. Početni gornji trag pokazuje poziciju prekidača 6 BB1, početni srednji trag pokazuje komandni impuls za manuelno prevođenje i početni donji trag pokazuje poziciju prekidača 6 BB17.

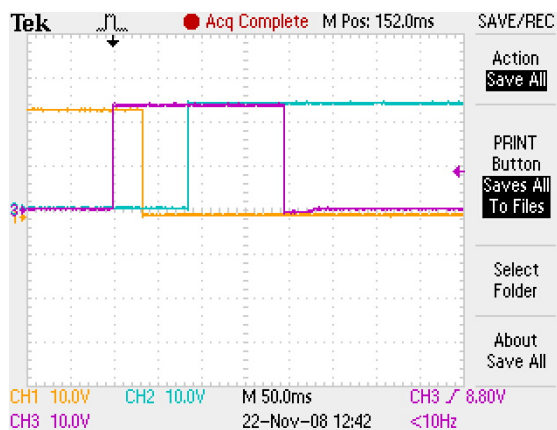
Potom je izvršeno uspešno prevođenje napajanja sabirnica 6BB sa glavnog na rezervno, takođe manuelnom komandom.

PROBA KOMUTOVANJA NAPAJANJA SABIRNICA 6BA



Slika 7. Tragovi signala tokom prevođenja motornih sabirnica 6 BA sa rezervnog na glavno napajanje. Početni gornji trag pokazuje poziciju prekidača 6 BA19, početni srednji trag pokazuje komandni impuls za manuelno prevođenje i početni donji trag pokazuje poziciju prekidača 6 BA6.

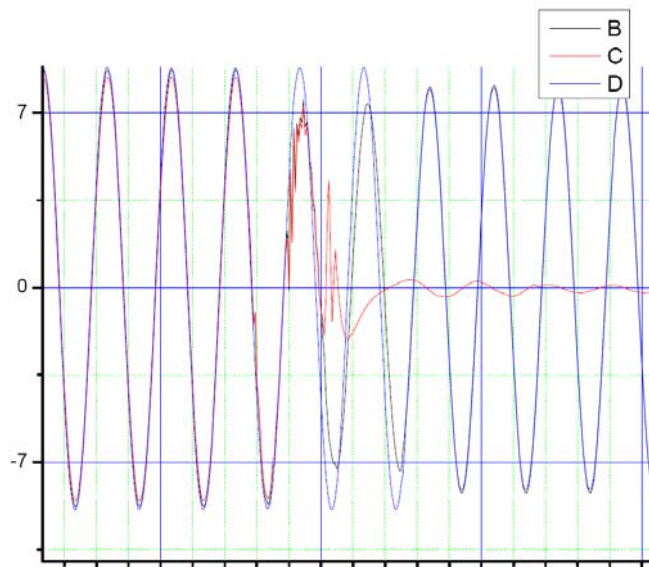
Dana 22.11. u 11:30 su se stekli uslovi za realnu probu automatskog prevođenja obe motorne sabirnice (6BA i 6BB) putem generisanja signala zaštite koji će istovremeno isključiti i prekidač 400 kV bloka A6. Digitalni memorijski osciloskop je ostao vezan za AUR automat na sabirnicama 6 BA. Snimljeni tragovi su prikazani na slici 8.



Slika 8. Tragovi signala tokom prevođenja motornih sabirnica 6 BA sa glavnog na rezervno napajanje. Početni gornji trag pokazuje poziciju prekidača 6BA6, početni srednji trag pokazuje komandni impuls za automatsko prevođenje (signal generisan od zaštite) i početni donji trag pokazuje poziciju prekidača 6 BA19.

Test izbacivanja 400 kV prekidača je doveo do pravilnog prebacivanja napajanja obe motorne sabirnice (6BA i 6BB) sa glavnog na rezervna napajanja, čime je zaključeno da su instalirani uređaji u funkciji.

Snimak reagovanja automata AUR pri realnoj situaciji (zaštita otvara prekidač generatora na 400 kV, TEKO B1, pri punom teretu generatora) je prikazan na slici 9.



Slika 9. Reagovanje AUR-a na bloku B1 TEKO B. Merni naponi su skalirani a vremenska podela je 10ms/pod. Trag B (fazno pomeren u centralnom delu slike) je napon motornih sabirnica, trag C (opadajući) je napon glavnog napajanja sa generatorskog transformatora a trag D je napon rezervnog napajanja.

Na slici 9 se vidi da po ispadanju glavnog prekidača i gubitka glavnog napajanja motornih sabirnica 6 kV, napon motornih sabirnica smanji svoju amplitudu i počne da fazno kasni u odnosu na fazu rezervnog napajanja (u početnom delu snimka sva tri napona su sinhronizovana). Međutim, posle 40 ms do 50 ms dolazi do preklapanja talasnog oblika napona motornih sabirnica i izvoda rezervnog napajanja. Ova operacija je izvedena bez gubitka napajanja motornih sabirnica 6 kV.

6. ZAKLJUČAK

Razvijen je uređaj i uprošćeni algoritam za brzo prebacivanje motornih sabirnica 6 kV na rezervno napajanje. Sam uređaj je baziran na standardnom industrijskom PLC-u koji donosi izvršne odluke, a brzo procesiranje pomoćnih signala se vrši na specijalno projektovanom elektronskom sklopu.

Primenom mreže resetabilnih integratora vrši se brza estimacija frekvencija, napona i fazne razlike između motornih i rezervnih 6 kV sabirnica. Procena trenutka uklapanja pri prvoj faznoj koincidenciji se vrši uz korišćenje uprošćenog modela gašenja polja kaveznog motora. Prikazana je i mogućnost unapređenja algoritma.

Rezultati dobijeni merenjima na eksperimentalnom modelu se u potpunosti slažu sa teorijskim predviđanjima. Tako razvijena serija uređaja je uspešno ugrađena na blokovima TE „Kostolac B“, B1 i TE „Nikola Tesla A“, A3 i A6.

LITERATURA

- [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.
- [6] T.Gajić, Ž. Janda, G. Rajković, L.J. Mihailović, ”Realizacija uređaja za automatsko prebacivanje napajanja motornih sabirnica 6 kv na rezervno napajanje”, 29. savetovanje CIGRE SRBIJA, Zlatibor, 31. maj - 6. jun, Referat B4-08

Abstract: In the paper the high speed motor bus transfer design and 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 the 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*

DESIGN OF HIGH SPEED TRANSFER DEVICE FOR MEDIUM VOLTAGE MOTOR BUS SUPPLY TRANSFER

Tomislav Gajić, Žarko Janda, Mladen Milošević, Dušan Arnautović
Electrical Engineering Institute “Nikola Tesla”, Belgrade