

**ANALIZA DELOVANJA TERMIČKE ZAŠTITE KOD OPASNIH POGONSKIH STANJA ASINHRONIH MOTORA****ANALYSIS OF THERMAL PROTECTION TRIPPING IN ABNORMAL OPERATION CONDITIONS OF ASYNCHRONOUS MOTORS**Biljana Milošević, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – DISTRIBUIRANI  
ELEKTROENERGETSKI RESURSI I PAMETNE  
MREŽE**

**Kratak sadržaj** – Ovaj rad bavi se analizom delovanja termičke zaštite kod opasnih pogonskih stanja asinhronih motora. Za tu analizu korišćen je matematički model asinhronog motora, a zatim su napravljene simulacije opasnih pogonskih stanja u Simulinku. Posmatrani su naponi, brzina i struje u ovim stanjima sa ciljem da se procenti da li će se delovati termičkom zaštitom.

**Ključne reči** – Asinhroni motor, opasna pogonska stanja asinhronih motora, termički relej.

**Abstract** – This paper deals with the analysis of the effect of thermal protection in abnormal operating conditions of induction motors. For this analysis, a mathematical model of an induction motor was used, and then simulations of dangerous operating conditions were made in Simulink. Voltages, velocities and currents in these states were observed in order to determine whether thermal protection will be applied.

**Keywords** – Asynchronous motor, abnormal operating conditions of asynchronous motors, thermal protection.

**1. UVOD**

Ovaj rad se bavi analizom delovanja termičke zaštite asinhronog motora u opasnim pogonskim stanjima. Za te analize je korišćen odgovarajući matematički model asinhronog motora zajedno sa Simulink paketom.

U drugoj glavi dat model asinhronog motora potreban za analize u ovom radu. U trećoj glavi su data opasna pogonska kao i ona koja se razmatraju u ovom radu. Dat je i opis termičke zaštite od ovakvih stanja. U četvrtoj glavi je analiziran delovanje termičke zaštite za izabrana opasna pogonska stanja asinhronog motora pomoću programskog paketa Simulink. U petoj glavi je zaključak, a u šestoj literatura koja je korišćena u izradi ovog rada.

**2. ASINHRONI MOTOR**

Za potrebe analize opasnih pogonskih stanja korišćen je matematički model asinhronog motora. Praktično standardni postupak podrazumeva da polazi od matematičkog

**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Duško Bekut, red. prof.

modela asinhronog motora u faznom domenu koji se zatim primenom transformacija svodi u dq domen (rotorske veličine svedene na statorsku stranu) [1]:

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_s \psi_q, \quad (1)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_s \psi_d, \quad (2)$$

$$0 = R_r i'_d + \frac{d\psi'_d}{dt} - \omega_K \psi'_q, \quad (3)$$

$$0 = R_r i'_q + \frac{d\psi'_q}{dt} + \omega_K \psi'_d, \quad (4)$$

$$\psi_d = L_s i_d + L_m i'_d, \quad (5)$$

$$\psi_q = L_s i_q + L_m i'_q, \quad (6)$$

$$\psi'_d = L_s i'_d + L_r i''_d, \quad (7)$$

$$\psi'_q = L_s i'_q + L_r i''_q, \quad (8)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (m_e - m_m - \frac{k_{tr}}{p} \omega), \quad (9)$$

gde su:

$u_d, u_q$  – naponi na d i q namotajima statora,

$i_d, i_q$  – struje u d i q namotajima statora,

$\psi_d, \psi_q$  – fluksni obuhvati d i q namotaja statora,

$i'_d, i'_q$  – struje u D i Q namotajima rotora,

$\psi'_d, \psi'_q$  – fluksni obuhvati u D i Q namotajima rotora,

$R_s, R_r$  – otpornosti namotaja statora i rotora,

$\omega_s$  – ugaona učestanost napajanja i

$\omega_K$  – ugaona učestanost klizanja,

$L_s$  – sopstvena induktivnost statora,

$L_r$  – sopstvena induktivnost rotora,

$L_m$  – međusobna induktivnost statora i rotora,

$p$  – broj pari polova,

$J$  – momenat inercije,

$\omega$  – električna ugaona brzina rotora,

$k_{tr}$  – koeficijent trenja.

Ovako dobijeni model asinhronog motora se koristi za simulacije i proveru delovanja termičke zaštite kod opasnih pogonskih stanja asinhronog motora.

**3. OPASNA POGONSKA STANJA ASINHRONIH MOTORA**

U opasna pogonska stanja asinhronog motora se ubrajaju [2]:

- Preopterećenje asinhronog motora – ovakvo stanje nastaje kada je momenat opterećenja asinhronog motora veći od nazivnog momenta.

- Nestanak i ponovni povratak napona – do ovog stanja dolazi usled planiranih i neplaniranih isključenja mreže, pregrevanja, preopterećenja i kratkih spojeva, nestabilnog napajanja mreže.
- Pojava inverznog redosleda faza – ovo stanje uglavnom je posledica ljudske greške usled zamene faznih provodnika prilikom priključenja.
- Rad trofaznog asinhronog motora bez jedne faze – rad asinhronog motora bez jedne faze je situacija kada u toku rada dođe do kvara na jednoj fazi.
- Predugo vreme zaletanja asinhronog motora – u slučaju kada pokretanje asinhronog motora traje dugo i kada su struje pri pokretanju velike može doći do termičkog preopterećenja asinhronog motora.

Ako se ovakva stanja ne bi na vreme eliminisala, dovela bi do pregrevanja i proboja izolacije, odnosno, uništenja samog asinhronog motora.

U ovom radu su analizirana sledeća pogonska stanja asinhronog motora:

1. Zalet asinhronog motora u normalnim uslovima.
2. Prekid faze sa visokonaponske (VN) strane transformatora.
3. Start sa povećanim momentom opterećenja.

Poslednja dva stanja su opasna pogonska stanja asinhronog motora za koje je analizirano da li će termička zaštita delovati. Provera zaštite rađena je tako što je na grafike struje starta asinhronog motora dodata karakteristika termičkog releja. Ukoliko u stanju kvara karakteristika termičkog releja (isprekidanom crvenom linijom je obeležene vrednosti vrha trenutne vrednosti podešenja ove zaštite) preseca vrednost struje asinhronog motora znači da zaštita deluje.

### 3.1. Zaštita motora termičkim relejom

Rad termičkog releja zasnovan je na praćenju struje koja teče kroz štice objekta – u ovom slučaju asinhroni motor. Kroz ovu zaštitu protiče struja asinhronog motora i isključuje napajanje ukoliko struja pređe zadati prag. Ove zaštite su najčešće bimetalne zaštite prilagođene datom tipu asinhronog motora kako bi se postiglo brže zagrevanje ove zaštite u odnosu na štice asinhroni motor.

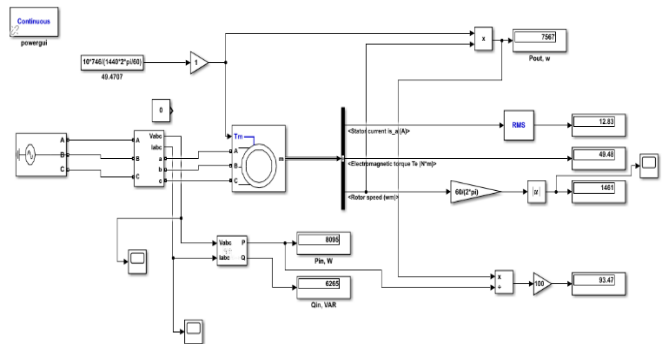
Standardno podešena termička zaštita podrazumeva da je njena karakteristika delovanja u ustaljenom stanju za 5% viša u odnosu na nominalnu struju asinhronog motora, dok u periodu zaletanja motora ne sme presecati krive vrednosti struja asinhronog motora.

## 4. PROVERA DELOVANJA TERMIČKE ZAŠTITE

U ovom radu modelovan je asinhroni motor snage 7.5kW koji je priključen na izvor napajanja preko transformatora 10/0.4 kV/kV – prikaz ove šeme u Simulinku je na slici 1. Sve simulacije u ovom radu su napravljene korišćenjem ove šeme.

### 4.1. Rad motora u normalnim uslovima

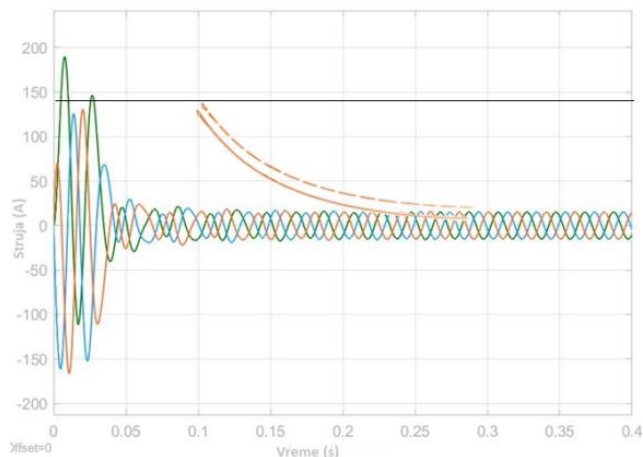
Ovo je polazni slučaj u odnosu na koji se razmatraju ostala opasna pogonska stanja. Na slici 2. predstavljena je zavisnost struje u vremenu i na njoj je dodata karakteristika termičkog releja koji se koristi za zaštitu asinhronog motora.



Slika 1. Razmatrani Simulink model motora i transformatora

Na slici 2. se može primetiti da su struje u fazama B i C asimetrične na početku zaleta. Ovo je posledica postojanja aperiodične komponente struje u tim fazama koja se vremenom prigušuje, pa tako nakon 0.15 s, ta asimetrija se gubi. Sve tri struje u ustaljenom stanju imaju maksimalnu vrednost od 17A.

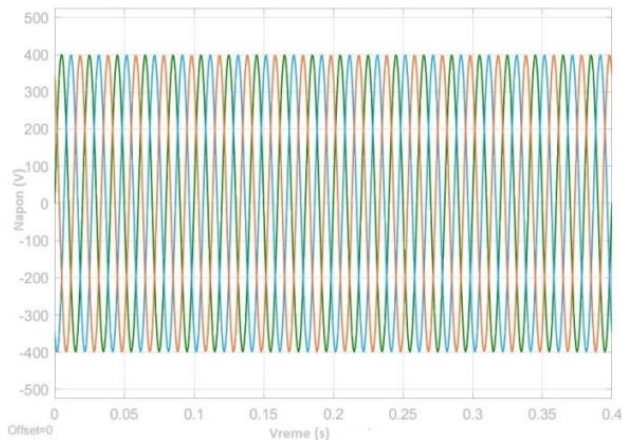
Sa slike 2. primećuje se da karakteristika termičkog releja (isprekidana crvena linija) ne preseca struju, odnosno, relej neće delovati.



Slika 2. Zavisnost struja u vremenu za slučaj zaleta u normalnim uslovima

Na slici 3. predstavljeni su naponi kada motor radi u stanju bez kvara. Vrednost napona u sve tri faze je 400V i fazno su pomereni za 120°.

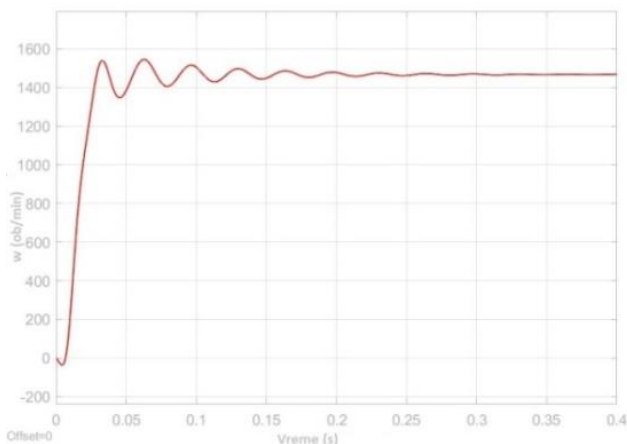
Iz praktičnih razloga je strujno vremenska karakteristika termičkog releja nacrtana nesrazmerno. Do preseka karakteristika termičkog releja i struje asinhronog motora bi došlo obično posle više desetina sekundi. Pošto u razmatranjima koja slede se podrazumeva da je termička zaštita podešena po pravilima podešavanja i saglasno datom tipu motora, u razmatranjima koja slede razmatra se samo da li će doći do delovanja termičkom zaštitom ili ne. Karakteristika termičkog releja prikazana je sa sažetom vremenskom osom da bi se mogla prikazati u graficima struja asinhronog motora neposredno posle ustaljenja prelaznih procesa po završetku zaleta asinhronog motora. To je urađeno sa ciljem da se ne bi nepotrebno produžavao dinamički proračun od nekoliko minuta ili par desetina minuta. Ovo je korišćeno na svim strujnim graficima sa karakteristikom termičkog releja.



Slika 3. Zavisnost napona u vremenu za slučaj zaleta u normalnim uslovima

Na slici 4. data je zavisnost brzine obrtanja asinhronog motora u vremenu.

Sa slike 3. može se uočiti da se brzina asinhronog motora ustali nakon 0.35s na vrednost od 1461 obr/min.



Slika 4. Zavisnost brzine obrtanja u vremenu pri zaletu u normalnim uslovima

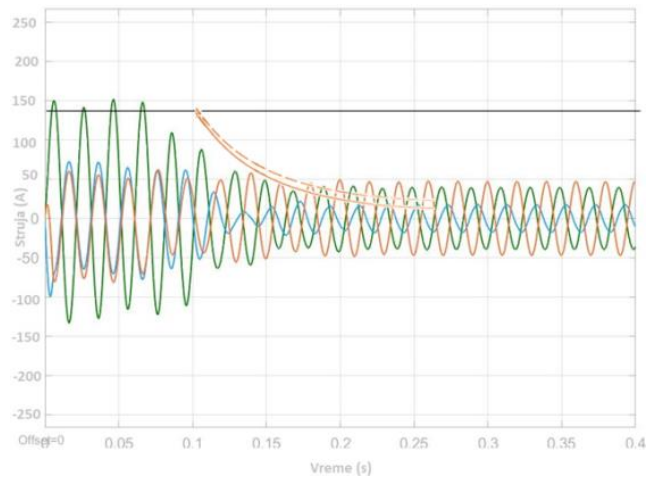
#### 4.2. Prekid faze sa VN strane transformatora

Asinhroni motor je preko transformatora 10/0.4 kV/kV povezan na izvor napajanja. Može se desiti da u toku rada asinhronog motora dođe do prekida faze sa VN strane transformatora (npr. pregorevanje jednog osigurača). Na slici 5. predstavljene su struje sa niskonaponske (NN) strane transformatora kada se desi takav prekid.

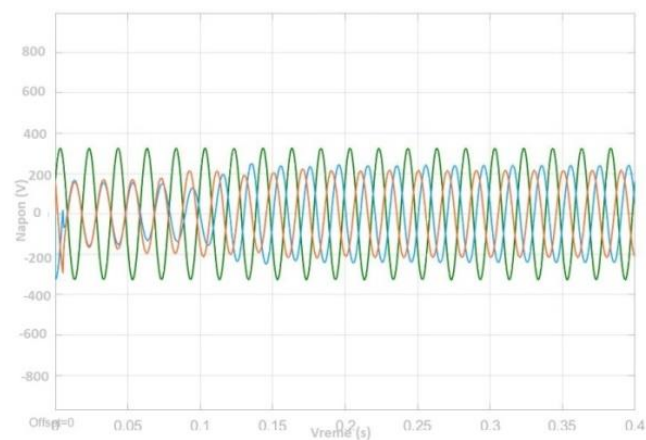
Sa slike 5. se uočava da se struja u fazi C sa NN strane ustaljuje na vrednost od 49A (pri prekidu u fazi C sa VN strane). Struja u fazi A je nešto manja u odnosu na normalno stanje i ustaljuje se na 41A, a u fazi B najmanja i iznosi 14A.

Sa ove slike uočava se da karakteristika termičkog releja preseca krive struja. Dakle, ukoliko se desi prekid faze sa VN strane transformatora termički relej će delovati i asinhroni motor će biti zaštićen.

Na slici 6. date su vrednosti napona kada se desi prekid sa VN strane transformatora. Napon faze A u kojoj se desio prekid je 320V, dok je u ostale dve faze manji (u fazi B je 250V i fazi C je 216V).



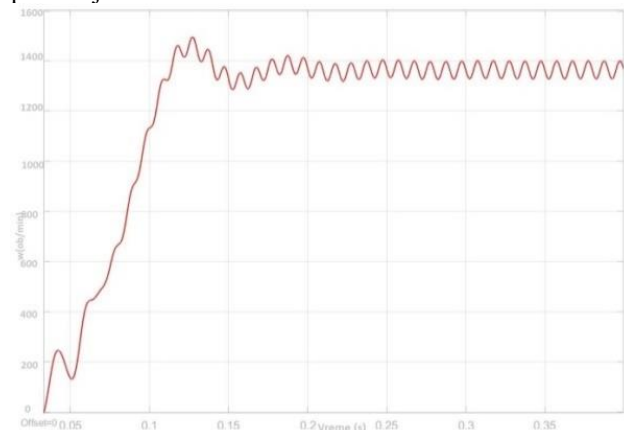
Slika 5. Struje starta asinhronog motora pri prekidu faze sa VN strane transformatora



Slika 6. Napon pri prekidu faze sa VN strane transformatora

Na slici 7. prikazana je brzina obrtanja asinhronog motora kada se desi prekid faze sa VN strane transformatora.

Sa slike 7. se uočava da se brzina asinhronog motora ustaljuje na 1400ob/min. Ta brzina je manja od nominalne brzine obrtanja asinhronog motora. Brzina u ustaljenom stanju ima oscilacije koje imaju za rezultat povećanje gubitaka u asinhronom motoru. Zbog ovih gubitaka nije prihvatljivo da motor radi u ovakvom režimu.

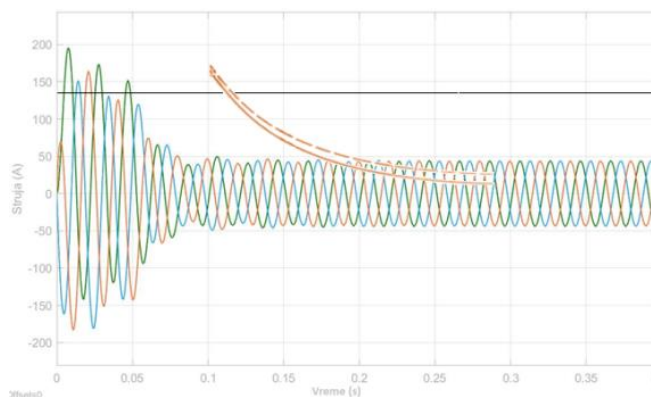


Slika 7. Zavisnost brzine obrtanja u vremenu pri prekidu faze sa VN strane transformatora

### 4.3. Start asinhronog motora sa povećanim momentom opterećenja

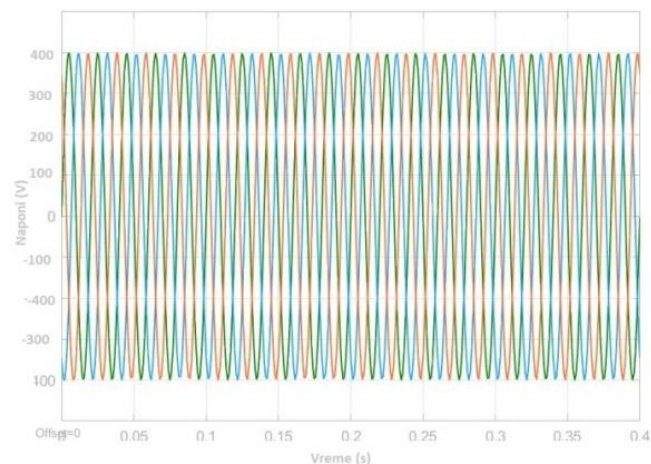
Moment opterećenja za asinhroni motor na kome su vršene simulacije iznosi 49Nm. Neka se pretpostavi da se moment opterećenja poveća za 100Nm, odnosno, da je 149Nm. Pri takvom startu asinhronog motora dobijaju se struje koje su prikazane na slici 8.

Struje se ustaljuju nakon 0.13s uz porast struja u ustaljenom stanju u odnosu na struje sa nominalnim momentom opterećenja za 30A. Vrednosti struja su iste u sve tri faze u ustaljenom stanju – slika 8. Sa ove slike se uočava da se karakteristika termičke zaštite preseca struju starta asinhronog motora, dakle, zaštita će delovati ukoliko dođe do povećanja momenta opterećenja.



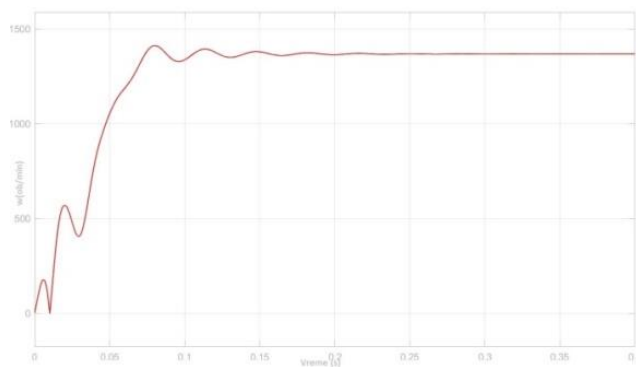
Slika 8. Struje starta pri povećanom momentu opterećenja

Na slici 9. dati su naponi za slučaj sa pomenutim povećanjem momenta opterećenja asinhronog motora. Naponi su nepromenjeni u odnosu na zalet asinhronog motora u normalnim uslovima, što je i očekivan rezultat.



Slika 9. Naponi pri povećanom momentu opterećenja

Na slici 10. data je brzina obrtanja pri pomenutom povećanom momenta opterećenja koja je očekivano manja u odnosu na nominalnu.



Slika 10. Brzina obrtanja pri povećanom momentu opterećenja

## 5. ZAKLJUČAK

U radu je analizirano delovanje standardno podešene termičke zaštite za izabrane slučajeve opasnog pogonskog stanja. Dobijeni rezultati pokazuju da standardno podešena termička zaštita deluje kod svih razmatranih opasnih pogonskih stanja.

## 6. LITERATURA

- [1] Karlo Zamljačenec, „Zaštita asinhronog kaveznog motora”, Osijek, 2019.
- [2] Duško Bekut, „Relejna zaštita“, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2009.

### Kratka biografija:



**Biljana Milošević** rođena je u Loznici 1997. godine. Osnovne studije završila na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu 2021. godine iz oblasti Energetika, elektronika i telekomunikacije, smer Elektroenergetski sistemi. Master rad, na istom fakultetu, je odbranila 2024. godine. Kontakt: [biljanavasiljevic399@gmail.com](mailto:biljanavasiljevic399@gmail.com)