

Mihailo Micev\*  
Elektrotehnički fakultet Podgorica  
mihailo.micev@gmail.com

Vladan Vujičić  
Elektrotehnički fakultet Podgorica  
vladanv@ucg.ac.me

Martin Čalasan  
Elektrotehnički fakultet Podgorica  
martinc@ucg.ac.me

## PRIMJENA METAHEURISTIČKIH ALGORITAMA U OPTIMIZACIJI UGLOVA UKLJUČENJA I ISKLJUČENJA PREKIDAČKOG RELUKTANTNOG MOTORA

### KRATAK SADRŽAJ

U ovom radu demonstrirana je mogućnost primjene metaheurističkih algoritama u cilju određivanja optimalnih vrijednosti uglova uključenja i isključenja prekidačkog reluktantnog motora (PRM-a). Najprije su analizirane karakteristike PRM-a i uticaj kontrolnih parametara na izlaznu snagu motora. U nastavku su opisani sljedeći metaheuristički algoritmi: PSO (Particle Swarm Optimization), DE (Differential Evolution) i GWO (Grey Wolf Optimizer). Pomoću navedenih algoritama izvršena je optimizacija uglova uključenja i isključenja PRM-a u cilju dobijanja maksimalne snage vodeći računa o zadatom ograničenju efektivne vrijednosti struje u faznim namotajima. Takođe, prikazane su grafičke zavisnosti uglova uključenja i isključenja, kao i maksimalno dostupne snage u funkciji brzine obrtanja. Pokazano je da sva tri algoritma daju kao rezultat relativno bliske vrijednosti uglova uključenja i isključenja, čijom primjenom se, u svim slučajevima, dobija približno ista karakteristika snage.

**Ključne riječi:** Ugao uključenja i isključenja – Metaheuristički algoritam – Optimizacija – Prekidački reluktantni motor

## APPLICATION OF METAHEURISTIC ALGORITHMS IN THE OPTIMIZATION OF COMMUTATION ANGLES OF A SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

### SUMMARY

In this paper, possibility of applying metaheuristic algorithms in order to determine the optimal values of turn-on and turn-off angles for a switched reluctance motor (SRM) is demonstrated. First, the characteristics of SRM and the influence of the control parameters on the output power are analyzed. Afterwards, descriptions of following metaheuristic algorithms are given: PSO (Particle Swarm Optimization), DE (Differential Evolution) and GWO (Grey Wolf Optimizer). The mentioned algorithms are used for optimization of the turn-on and turn-off angles of SRM in order to achieve maximum power, taking into account the limitation of rms value of the phase current. Also, the graphical dependences of turn-on angle, turn-off angle and maximum available power on rotating speed are given. It is shown that all three algorithms give relatively close values of turn-on angle and turn-off angle as results. Therefore, by applying any of the considered algorithms, approximately the same power characteristic is obtained.

---

\* Ulica Miloša Obilića S2B II/29, 81 000 Podgorica

**Key words:** Commutation angles – Metaheuristic algorithm – Optimization – Switched Reluctance Motor

## 1. UVOD

Konstrukcija prekidačkog reluktantnog motora (PRM-a) je takva da na rotoru nema namotaja kao ni stalnih magneta. Kako na rotoru nema namotaja moment inercije rotora je mali pa je moguće ostvariti nagle promjene brzine. Sa druge strane, odsustvo stalnih magneta na rotoru omogućava rad u širokom opsegu brzina. Još jedna dobra osobina je ta što se međusobne induktivnosti faza najčešće mogu zanemariti, što znači da vrijednost struje u jednoj fazi nema uticaja na vrijednosti struje u drugim fazama, čime se problem modelovanja mašine svodi na modelovanje jedne faze. Međutim, modelovanje PRM-a otežava činjenica da magnetski materijal od kojeg je napravljen motor u normalnom režimu rada ulazi u zasićenje, tako da je induktivnost namotaja faze nelinearna funkcija ne samo pozicije rotora, već i struje [1] – [2]. Izražena talasnost momenta, uzrokovana istaknutom strukturom statora i rotora, predstavlja jednu od glavnih negativnih osobina PRM-a. Optimizacijom talasnog oblika faznih struja, pulsacije momenta moguće je značajno smanjiti, a pri malim brzinama gotovo i eliminisati [3].

Izlazne karakteristike PRM-a značajno variraju sa varijacijom upravljačkih parametara, čija optimalna vrijednost se generalno mijenja sa promjenom brzine i željenog obrtnog momenta PRM-a. Upravljački parametri PRM-a su: ugao uključenja (pozicija rotora pri kojoj se krajevi faznog namotaja priključuju na izvor jednosmjernog napona – počinje magnetizacija faze), ugao isključenja (pozicija rotora pri kojoj prestaje magnetizacija i počinje demagnetizacija faze) i referentna struja. Upravo zbog važnosti ovih parametara, brojni radovi se baziraju na određivanju njihovih vrijednosti kako bi performanse PRM-a bile što bolje. Optimizacija upravljačkih uglova bazirana na analitičkim izrazima je predstavljena u [4] – [7], pri čemu se u [4] – [6] koristi linearni model mašine, a u [7] se koristi pouzdaniji (tačniji) – nelinearni model. Kriterijumske funkcije su različite: u [4] cilj je postići maksimalni moment, u [5] glavni ciljevi su smanjenje pulsacija momenta i povećanje efikasnosti motora, u [6] cilj je postići optimalnu vrijednost momenta po amperu, a u [7] je takođe cilj postići što veću efikasnost motora. Pod prostom optimizacijom, koja je predstavljena u [8] – [9], podrazumijeva se ispitivanje svih kombinacija uglova uključenja i isključenja u određenim granicama i sa određenim korakom promjene ugla, koji mora biti veoma mali. Minimizacija pulsacija momenta je ciljna funkcija u [8], a postizanje što veće efikasnosti i najveće izlazne snage su ciljevi u [9]. Radi optimizacije upravljačkih parametara može se primijeniti i vještačka inteligencija. Primjena neuralnih mreža u cilju minimizacije pulsacija momenta je prikazana u [10] – [12], s tim što je u [10] postavljena i dodatna ciljna funkcija – smanjenje pulsacija brzine motora. Osim neuralnih mreža, radi optimizacije upravljačkih uglova se koristi i fazi logika [13] – [14]. Savremene metode optimizacije baziraju se i na metaheurističkim algoritmima koji su inspirisani prirodom i čija je glavna vrlina mogućnost rješavanja složenih optimizacionih problema. Jedan od najpoznatijih algoritama ove vrste je GA (Genetički Algoritam) koji se može iskoristiti za određivanje optimalnih vrijednosti uglova uključenja i isključenja upotrebljavajući različite funkcije cilja: maksimizacija srednje vrijednosti momenta i minimizacija efektivne vrijednosti pulsacije momenta [15], zatim povećanje efikasnosti i smanjenje pulsacija momenta [16]. Sličan Genetičkom Algoritmu je DE (Differential Evolution) algoritam čija je primjena u optimizaciji upravljačkih uglova PRM-a pokazana u [17], pri čemu je funkcija cilja definisana kao kombinacija tri veoma bitna zahtjeva: maksimizacija srednje vrijednosti momenta, minimizacija gubitaka u bakru i minimizacija pulsacija momenta. PSO (Particle Swarm Optimization) algoritam je još jedan metaheuristički algoritam koji je u [18] upotrijebljen u postupku optimizacije upravljačkih uglova za postizanje maksimalnog momenta po amperu. U [19] je dato poređenje GA i PSO algoritma prilikom optimizacije upravljačkih uglova, pri čemu je ciljna funkcija minimizacija pulsacije momenta i postizanje maksimalne srednje vrijednosti momenta.

Cilj ovog rada je ukazati na mogućnost uspješne primjene metaheurističkih algoritama u optimizaciji uglova uključenja i isključenja PRM-a, pri čemu se kao funkcija cilja uzima dobijanje maksimalne izlazne snage motora. U radu će biti razmatrana tri metaheuristička algoritma koja su korišćena za optimizaciju: PSO (Particle Swarm Optimization) [20] – [22], GWO (Grey Wolf Optimizer) [23] i DE (Differential Evolution) [24] – [25] i biće sagledane njihove performanse.

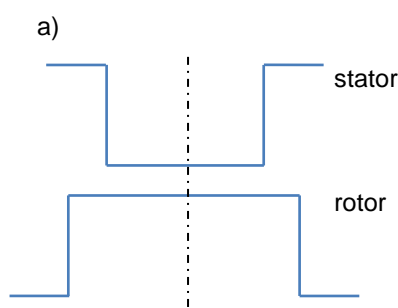
Rad je organizovan na sljedeći način: drugo poglavlje sadrži osnovne informacije o PRM-u (konstrukcija, princip rada i opis upravljačkih parametara), u trećem poglavlju su detaljno opisani metaheuristički algoritmi koji se koriste za optimizaciju, u četvrtom poglavlju su prikazani rezultati simulacija i na kraju, u zaključku se sumiraju postignuti rezultati.

## 2. PREKIDAČKA RELUKTANTNA MAŠINA

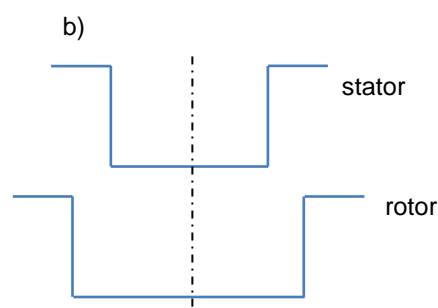
### 2.1. Konstrukcijske karakteristike

Konstrukcija prekidačke reluktantne mašine je veoma jednostavna – istaknuti polovi se nalaze na statoru i na rotoru, pri čemu na rotoru nema namotaja, kao ni stalnih magneta. Na statoru se nalaze koncentrični namotaji postavljeni tako da svaku fazu čine dva namotaja koja se nalaze oko međusobno suprotnih polova. Namotaji mogu biti vezani redno ili paralelno.

Dva najbitnija položaja rotora u odnosu na posmatrane polove statora su usaglašeni položaj koji je prikazan na slici 1a i neusaglašeni položaj koji je prikazan na slici 1b. Kada se rotor nalazi u usaglašenom položaju, reluktansa putanje fluksa je minimalna jer je vazdušni procjep najmanji, pa je induktivnost odgovarajućeg faznog namotaja maksimalna. Nasuprot tome, kada se rotor nalazi u neusaglašenom položaju, reluktansa putanje fluksa je maksimalna jer je vazdušni procjep najveći, pa je induktivnost već pomenutog faznog namotaja minimalna.

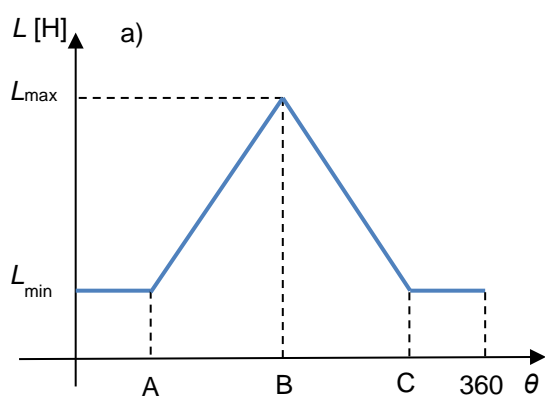


Slika 1a. Usaglašeni položaj rotora

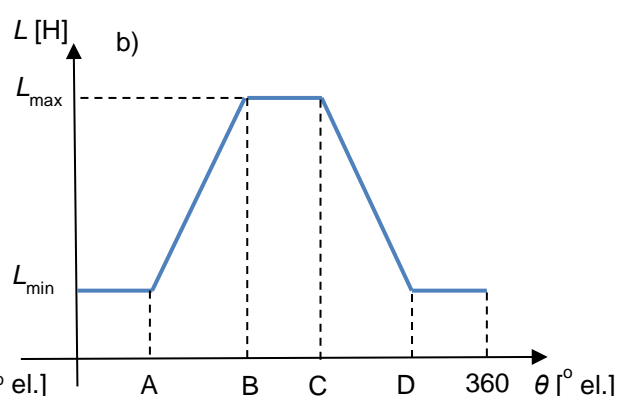


Slika 1b. Neusaglašeni položaj rotora

Ukoliko se rotor kreće od neusaglašenog ka usaglašenom položaju induktivnost faznog namotaja se povećava, a ako se rotor kreće od usaglašenog ka neusaglašenom položaju induktivnost se smanjuje. Ako se zanemari efekat zasićenja magnetskog materijala mašine, onda se može smatrati da induktivnost zavisi samo od pozicije rotora i da je ta zavisnost linearna. Usvajajući navedenu pretpostavku, zavisnost induktivnosti od međusobnog položaja rotora i statora je prikazana na slikama 2a i 2b, pri čemu slika 2a odgovara mašini sa jednakom širinom statorskih i rotorskih polova dok slika 2b odgovara mašini kod koje je širina polova rotora veća od širine polova statora.



Slika 2a. Induktivnost za jednaku širinu rotorskih i statorskih polova



Slika 2b. Induktivnost kada je širina rotorskih polova veća od širine statorskih polova

### 2.2. Princip rada i osnovne jednačine PRM-a

Kada se kroz fazni namotaj PRM-a propusti struja, javlja se i obrtni moment pod čijim dejstvom rotor uvijek nastoji da zauzme poziciju u kojoj je reluktansa minimalna, odnosno induktivnost

faze maksimalna (usaglašena pozicija). Kako usaglašenim pozicijama različitih faza odgovara različita pozicija rotora, naizmjeničnim i pravovremenim pobuđivanjem faza ostvaruje se kontinuirano obrtanje rotora u željenom smjeru.

Naponska jednačina jedne faze PRM-a data je izrazom (1)

$$u = R \cdot i + \frac{d\psi}{dt}, \quad (1)$$

gdje je  $u$  napon koji je doveden na fazni namotaj,  $i$  fazna struja,  $R$  otpornost namotaja faze, a  $\psi$  magnetsko obuhvatanje namotaja ( $\psi = N \cdot \phi$ ,  $N$  – broj navojaka,  $\phi$  – fluks kroz jedan navojak). Ukoliko se zanemari efekat zasićenja ( $L(\theta, i) \approx L(\theta)$ ) i uzme u obzir da je  $\psi = L(\theta) \cdot i$ , naponska jednačina se može zapisati na sljedeći način:

$$u = R \cdot i + L(\theta) \cdot \frac{di}{dt} + E, \quad (2)$$

gdje je  $E$  kontra – elektromotorna sila koja je direktno proporcionalna brzini.

Izraz za elektromagnetski moment kada se zanemaruje efekat zasićenja magnetskog kola mašine dat je izrazom (3):

$$M = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta}. \quad (3)$$

### 2.3. Upravljački parametri PRM-a

PRM ima 3 upravljačka parametra: ugao uključenja  $\theta_{on}$ , ugao isključenja  $\theta_{off}$  i referentna vrijednost struje. Kada se rotor nađe u položaju koji je definisan uglom  $\theta_{on}$  tada se krajevi faznog namotaja priključuju na izvor jednosmjernog napona, a kada se rotor nađe u poziciji  $\theta_{off}$  tada se mijenja polaritet napona, odnosno počinje demagnetizacija faze. Interval u kome se vrši magnetizacija faze naziva se ugao magnetizacije ( $\theta_{mag}$ ) i njegova vrijednost je  $\theta_{mag} = \theta_{off} - \theta_{on}$ . Međutim, struja kroz fazu protiče i nakon ovoga intervala, ali se u tom dijelu vrši demagnetizacija faze (ovom intervalu odgovara ugao  $\theta_{demag}$ ), pa je tada napon na fazi suprotnog polariteta ili je jednak nuli. Ugao provođenja  $\theta_p$  predstavlja interval u kojem protiče struja kroz fazni namotaj i iznosi  $\theta_p = \theta_{mag} + \theta_{demag}$ . Treći upravljački parametar, referentna struja, se koristi radi ograničenja maksimalne vrijednosti struje kroz fazni namotaj na statoru. Struju je neophodno ograničavati samo pri brzinama ispod osnovne, tj. kada kontra – elektromotorna sila ne dostiže vrijednost napona napajanja.

## 3. METAHEURISTIČKI ALGORITMI

Optimizacija se, najprostije rečeno, može definisati kao proces nalaženja vrijednosti promjenljivih tako da se postigne maksimalna ili minimalna vrijednost funkcije cilja, pri čemu optimalne vrijednosti promjenljivih moraju biti unutar zadatih granica. Opšta podjela metoda optimizacije je na klasične i metaheurističke. Klasične metode daju tačno – optimalno rješenje, ali vrijeme njihovog izvršavanja je veoma veliko za neke složenije probleme. Usljed nemogućnosti primjene klasičnih metoda za složene probleme, kao alternativa se javljaju metaheuristički algoritmi. Ovi algoritmi su stohastičke prirode, a ne determinističke, što znači da nađeno rješenje zavisi od skupa generisanih nasumičnih promjenljivih. Metaheuristički algoritmi ne garantuju da globalno optimalno rješenje može biti nađeno za neku klasu problema. Međutim, ukoliko metaheuristički algoritmi mogu pronaći rješenje za neki optimizacioni problem, to će uraditi za mnogo kraće vrijeme nego klasični optimizacioni algoritmi. U ovom radu su opisana tri metaheuristička algoritma i prikazana je njihova primjena u određivanju optimalnih uglova uključenja i isključenja PRM-a kojima se obezbjeđuje maksimalna izlazna snaga.

### 3.1. PSO (Particle Swarm Optimization) algoritam

Generalno, metaheuristički algoritmi su bazirani na prirodnim pojavama. PSO algoritam, kao jedan od predstavnika ove vrste algoritama, nastao je po uzoru na socijalno ponašanje jata ptica. Ovaj algoritam koristi populaciju čiji se članovi (promjenljive) kreću u prostoru određenim brzinama. U svakoj iteraciji, brzina pojedine promjenljive se mijenja na osnovu najbolje pozicije te promjenljive, kao i na osnovu najbolje pozicije svih promjenljivih. Najbolje pozicije se određuju na osnovu funkcije cilja (fitness function) koju definiše korisnik. Kretanje svake promjenljive prirodno teži ka optimalnom ili približno optimalnom rješenju.

Neka  $\vec{x}$  i  $\vec{v}$  predstavljaju vektore pozicija i brzina promjenljivih, respektivno:

$$\begin{aligned}\vec{x} &= [x_1, x_2, \dots] \\ \vec{v} &= [v_1, v_2, \dots].\end{aligned}\quad (4)$$

Pozicija i brzina pojedine promjenljive (označene indeksom  $i$ ) se ažuriraju prema sljedećim formulama:

$$x_i(t) = \begin{cases} x_i(t-1) + v_i(t), & x_{min} \leq x_i(t) \leq x_{max} \\ x_{min}, & x_i(t) < x_{min} \\ x_{max}, & x_i(t) > x_{max} \end{cases}, \quad (5)$$

$$v_i(t) = w \cdot v_i(t-1) + \varphi_1 \cdot rand_1 \cdot (p_i - x_i(t-1)) + \varphi_2 \cdot rand_2 \cdot (p_g - x_i(t-1)). \quad (6)$$

U formuli (6)  $\varphi_1$  i  $\varphi_2$  su pozitivni brojevi koji se nazivaju faktori ubrzanja,  $rand_1$  i  $rand_2$  su slučajni brojevi između 0 i 1,  $x_{min}$  i  $x_{max}$  su unaprijed definisane minimalna i maksimalna vrijednost pozicije, respektivno.

Relacija (6), pomoću koje se vrši ažuriranje brzine svake promjenljive, sastoji se iz tri komponente:

- Prva komponenta  $wv_i(t-1)$  se naziva „inercionom“ komponentom. Modeluje tendenciju promjenljive da nastavi svoje kretanje u datom pravcu. Koeficijent  $w$  se naziva težinski koeficijent i računa se prema sljedećoj formuli:

$$w = w_{max} - (w_{max} - w_{min}) \frac{Iteration}{Iteration_{max}}, \quad (7)$$

gdje je  $Iteration$  trenutna iteracija,  $Iteration_{max}$  je maksimalan broj iteracija,  $w_{max}$  i  $w_{min}$  su maksimalna i minimalna vrijednost težinskog koeficijenta, respektivno.

- Druga komponenta  $\varphi_1 \cdot rand_1 \cdot (p_i - x_i(t-1))$  predstavlja linearno približavanje najboljoj poziciji  $i$ -te promjenljive  $p_i$  (kojoj odgovara vrijednost funkcije cilja  $p_{best,i}$ ).

- Treća komponenta brzine  $\varphi_2 \cdot rand_2 \cdot (p_g - x_i(t-1))$  predstavlja linearno približavanje najboljoj poziciji svih promjenljivih  $p_g$  (kojoj odgovara vrijednost funkcije cilja  $g_{best}$ ) [20] – [22].

### 3.2. GWO (Grey Wolf Optimizer) algoritam

Inspiracija za ovaj algoritam je pronađena u ponašanju vrhovnih predatora - sivih vukova (grey wolves) u prirodi. Čopor sivih vukova je hijerarhijski organizovan: na vrhu ljestvice su alfa vukovi, ispod njih su beta vukovi, zatim slijede delta vukovi i na samom dnu ljestvice, omega vukovi. Još jedan interesantan aspekt socijalnog ponašanja vukova je grupni lov, koji se sastoji iz 3 faze: praćenje plijena, okruživanje plijena i napad na plijen.

U cilju matematičkog modelovanja socijalne hijerarhije vukova, pozicija alfa vuka predstavlja najbolje rješenje za zadati optimizacioni problem. Pozicije beta i delta vukova predstavljaju najbolja rješenja nakon alfa vuka, dok su ostala rješenja ustvari pozicije omega vukova.

Kao što je već pomenuto, prilikom grupnog lova vukovi okružuju plijen. Ovaj proces se može matematički modelovati formulom (8):

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)|, \quad (8)$$

gdje  $t$  predstavlja trenutnu iteraciju,  $\vec{X}$  vektor pozicije sivih vukova,  $\vec{X}_p$  vektor pozicije plijena, a  $\vec{A}$  i  $\vec{C}$  su vektori koeficijenata koji se računaju prema formuli (9):

$$\begin{aligned}\vec{A} &= 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \\ \vec{C} &= 2 \cdot \vec{r}_2,\end{aligned}\quad (9)$$

pri čemu su elementi vektora  $\vec{r}_1$  i  $\vec{r}_2$  slučajni brojevi između 0 i 1, a komponente vektora  $\vec{a}$  linearno opadaju tokom iteracija sa vrijednosti 2 na vrijednost 0, prema formuli (10) (u kojoj  $t_{max}$  predstavlja maksimalni broj iteracija):

$$\vec{a} = 2 - 2 \cdot \frac{t}{t_{max}}. \quad (10)$$

Vektor pozicija vukova sadrži pozicije od kojih svaka predstavlja jedno od rješenja za zadati problem optimizacije. Rješenje ne mora sadržati u sebi samo jedan parametar, već je broj parametara jednak dimenzionalnosti rješenja. Na taj način, za  $D$ -dimenzionalni optimizacioni problem, rješenje ovog algoritma – pozicija alfa vuka se sastoji od  $D$  parametara (brojeva) koji predstavljaju optimalno rješenje početnog optimizacionog problema.

Međutim, prilikom primjene formule (8) postoji problem – lokacija plijena nije tačno poznata, što se za neki optimizacioni problem može prevesti kao da lokacija optimuma nije poznata. Stoga, radi prevazilaženja ovog problema i matematičkog modelovanja procesa grupnog lova, pretpostavlja se da alfa, beta i delta vukovi imaju bolje „znanje“ o lokaciji plijena u odnosu na ostale (omega) vukove. Uzimajući to u obzir, prva tri najbolja rješenja se čuvaju (pozicije alfa –  $\alpha$ , beta –  $\beta$  i delta –  $\delta$  vukova), a pozicije omega –  $\omega$  vukova se ažuriraju prema pozicijama vrhovna tri vuka. Opisani proces se modeluje formulama (11), (12) i (13):

$$\bar{D}_\alpha = |\bar{C}_1 \cdot \bar{X}_\alpha - \bar{X}|, \bar{D}_\beta = |\bar{C}_2 \cdot \bar{X}_\beta - \bar{X}|, \bar{D}_\delta = |\bar{C}_3 \cdot \bar{X}_\delta - \bar{X}|, \quad (11)$$

$$\bar{X}_1 = \bar{X}_\alpha - \bar{A}_1 \cdot \bar{D}_\alpha, \bar{X}_2 = \bar{X}_\beta - \bar{A}_2 \cdot \bar{D}_\beta, \bar{X}_3 = \bar{X}_\delta - \bar{A}_3 \cdot \bar{D}_\delta, \quad (12)$$

$$\bar{X}(t+1) = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3}{3}. \quad (13)$$

Algoritam se završava kada se dostigne maksimalan broj iteracija ( $t_{max}$ ), a rješenje optimizacionog problema je trenutna pozicija alfa vuka ( $\bar{X}_\alpha$ ) [23].

### 3.3. DE (Differential Evolution) algoritam

Prilikom implementacije ovog algoritma definiše se populacija koja se sastoji od vektora  $\bar{x}_i^G$ ,  $i=1, 2, 3, \dots, NP$ , gdje  $NP$  označava veličinu populacije,  $G$  označava redni broj generacije (iteracije), a  $i$  označava redni broj vektora. Jedan vektor  $\bar{x}$  predstavlja jedno rješenje i naziva se genom ili hromozom. Jedno rješenje se sastoji iz  $D$  parametara, gdje  $D$  predstavlja dimenziju problema, a samim tim i rješenja. Drugim riječima, vektor  $\bar{x}$  ima  $D$  elemenata. Takođe je potrebno definisati i funkciju cilja (fitness funkciju)  $f$ , čija minimizacija je cilj ovog algoritma. Koraci u implementaciji DE algoritmi su sljedeći:

1.) Inicijalizacija populacije:

$$x_{j,i}^0 = rand_{j,i}[0,1] \cdot (x_j^{(U)} - x_j^{(L)}) + x_j^{(L)}, \quad (14)$$

gdje  $j=1, 2, \dots, D$ , a  $x_j^{(U)}$  i  $x_j^{(L)}$  predstavljaju gornju i donju granicu za parametar  $j$ , respektivno.

2.) Mutacija:

Za svaki vektor  $\bar{x}_i^G$  generiše se vektor mutacije  $\bar{v}_i^{G+1}$  prema formuli (15):

$$\bar{v}_i^{G+1} = \bar{x}_{n_1}^G + F \cdot (\bar{x}_{n_2}^G - \bar{x}_{n_3}^G), \quad (15)$$

pri čemu su  $n_1, n_2$  i  $n_3$  nasumično odabrani i međusobno različiti indeksi koji takođe moraju biti različiti od trenutnog indeksa  $i$ , a  $F$  je parametar koji se ne mijenja tokom procesa optimizacije i koji uzima vrijednost iz opsega (0,2].

3.) Krosing – over ili rekombinacija:

U procesu rekombinacije definiše se probni vektor  $\bar{u}_i^{G+1}$  (16):

$$u_{j,i}^{G+1} = \begin{cases} v_{j,i}^{G+1}, & rand[0,1] \leq CR \text{ ili } j = k \\ x_{j,i}^G, & \text{inače} \end{cases}, \quad (16)$$

pri čemu  $j=1, 2, \dots, D$ , a  $k$  je nasumično odabrani broj iz skupa  $\{1, 2, \dots, D\}$  koji se bira ponovo za svako  $i$  (za svaki hromozom).  $CR$  je parametar iz intervala [0,1] koji se naziva faktor rekombinacije i koji kontroliše vjerovatnoću da komponenta probnog vektora bude iz vektora mutacije  $\bar{v}_i^{G+1}$  umjesto iz roditeljskog vektora  $\bar{x}_i^G$ . Uslov  $j=k$  je neophodan kako bi se osiguralo da bar jedan parametar probnog vektora bude iz vektora mutacije.

4.) Selekcija:

Posljednji korak je selekcija, tj. određivanje populacije za sljedeću generaciju. Radi toga, vrši se poređenje probnog vektora  $\bar{u}_i^{G+1}$  i roditeljskog vektora  $\bar{x}_i^G$ , pa se naredna generacija određuje na sljedeći način:

$$\bar{x}_i^{G+1} = \begin{cases} \bar{u}_i^{G+1}, & f(\bar{u}_i^{G+1}) \leq f(\bar{x}_i^G) \\ \bar{x}_i^G, & f(\bar{x}_i^G) \leq f(\bar{u}_i^{G+1}) \end{cases} \quad (17)$$

Na ovaj način je osigurano da je svaka individua odnosno hromozom naredne generacije isti ili bolji od njemu odgovarajućeg iz prethodne generacije. Na kraju, iz populacije posljednje generacije određuje se najbolji hromozom (onaj vektor  $\bar{x}_i$  za koji funkcija cilja ima najmanju vrijednost) i on predstavlja optimalno rješenje problema [24] – [25].

#### 4. REZULTATI SIMULACIJA

Opisani metaheuristički algoritmi su primijenjeni u cilju određivanja optimalnih vrijednosti uglova uključenja ( $\theta_{on}$ ) i uglova isključenja ( $\theta_{off}$ ) kako bi se dobila maksimalna izlazna snaga PRM-a pri bilo kojoj brzini. S obzirom na to da prikazani algoritmi vrše minimizaciju funkcije cilja, funkcija cilja  $f$  se definiše kao

$$f = \frac{1}{P}, \quad (18)$$

gdje je  $P$  izlazna snaga motora.

Simulacije su sprovedene u programskom paketu Matlab, i to na računaru sljedećih hardverskih karakteristika: procesor AMD A4 – 6210 4x1.8 GHz, AMD Radeon R3 grafička kartica i 4 GB RAM memorije.

Prilikom primjene navedenih algoritama neophodno je definisati granice unutar kojih se mogu naći promjenljive koje se optimizuju: za ugao uključenja se uzimaju granice  $0 - 90^\circ$  (električnih), a za ugao isključenja  $100 - 170^\circ$  električnih. Za PSO i GWO algoritme je usvojeno da veličina populacije iznosi 100, a za DE algoritam veličina populacije iznosi 50. Maksimalan broj iteracija iznosi 200 za sva tri algoritma. Podaci o motoru su sljedeći: napon napajanja  $u=250$  V, referentna vrijednost struje  $I=3.46$  A, maksimalna dozvoljena efektivna vrijednost struje  $I_{ef}=2$  A, broj polova rotora  $N_r=4$ , broj faza  $m=3$ , minimalna induktivnost  $L_{min}=13$  mH, maksimalna induktivnost  $L_{max}=57$  mH, otpornost namotaja faze  $R=4$   $\Omega$ , širina pola rotora  $\beta_r=32^\circ$  mehaničkih i širina pola statora  $\beta_s=30^\circ$  mehaničkih. Navedenim širinama polova rotora i statora odgovara trapezoidni tip induktivnosti sa podacima (slika 2b): A= $56^\circ$ , B= $176^\circ$ , C= $184^\circ$  i D= $304^\circ$ . Optimizacija je izvršena za brzine  $0 - 15000$  ob/min sa korakom  $1000$  ob/min. Navedeni podaci o motoru su karakteristike realnog motora koje su preuzete iz [2].

Za parametre PSO algoritma su usvojene sljedeće vrijednosti:  $\varphi_1=0.5$ ,  $\varphi_2=0.1$ ,  $w_{max}=0.5$  i  $w_{min}=0.1$ , a za parametre DE algoritma vrijednosti:  $F=0.85$  i  $CR=0.9$ .

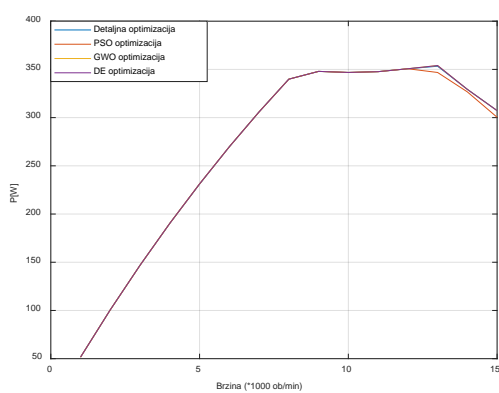
Rezultati dobijeni primjenom metaheurističkih algoritama biće upoređeni sa rezultatima dobijenim pomoću algoritma koji nema stohastičku prirodu, već je deterministički i naziva se algoritam detaljne optimizacije. Princip rada ovog algoritma je sljedeći: prvo se pronade maksimalna vrijednost snage i odgovarajuće vrijednosti uglova uključenja i isključenja pri čemu se vrši ispitivanje svih mogućih kombinacija uglova sa korakom  $5^\circ$ , a zatim se ispituje region  $\pm 5^\circ$  od već utvrđenih vrijednosti uglova, ali sa mnogo manjim korakom koji iznosi  $0.1^\circ$  i u tom regionu se traže vrijednosti maksimalne snage i pripadajućih uglova uključenja i isključenja.

Rezultati dobijeni pomoću sva tri metaheuristička algoritma kao i pomoću algoritma detaljne optimizacije su prikazani tabelarno i grafički. U tabeli I su prikazane vrijednosti maksimalnih izlaznih snaga motora kao i odgovarajućih vrijednosti uglova uključenja i isključenja, na slici 3 prikazane su vrijednosti maksimalne izlazne snage motora u funkciji brzine obrtanja, a na slikama 4 i 5 odgovarajuće vrijednosti uglova uključenja i uglova isključenja, respektivno. Mada je uočljivo izvjesno odstupanje u vrijednostima uglova uključenja i isključenja na prikazanim karakteristikama, karakteristika snage PRM-a u svim slučajevima je gotovo identična. Drugim riječima, optimizacija je uspješno izvršena korišćenjem bilo kojeg od tri razmatrana metaheuristička algoritma.

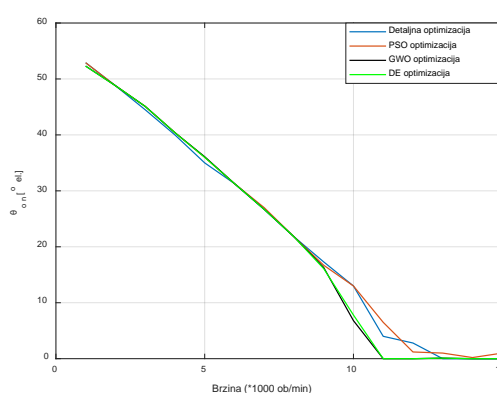
Pojedini talasni oblici struje i momenta koji odgovaraju utvrđenim optimalnim uglovima prikazani su na slikama 6 – 11. Na slici 6 su prikazane struje sve tri faze, na slici 7 momenti sve tri faze, a na slici 8 ukupni moment, pri brzini  $2000$  ob/min. Na slikama 9, 10 i 11, respektivno, prikazane su struje sve tri faze, momenti sve tri faze i ukupni moment, koji odgovaraju brzini  $9000$  ob/min, pri čemu su optimalne vrijednosti upravljačkih uglova utvrđene detaljnom optimizacijom. Na slici 12 dato je poređenje talasnih oblika ukupnog momenta motora koji odgovaraju optimalnim uglovima utvrđenim pomoću detaljne optimizacije i PSO algoritma, pri brzini  $14000$  ob/min. Sa prikazane slike se uočava da se talasni oblici momenta neznatno razlikuju, ali srednja vrijednost momenta, a samim tim i izlazne snage motora, približno je ista, što se može vidjeti sa slike 3.

Tabela I. Rezultati optimizacije

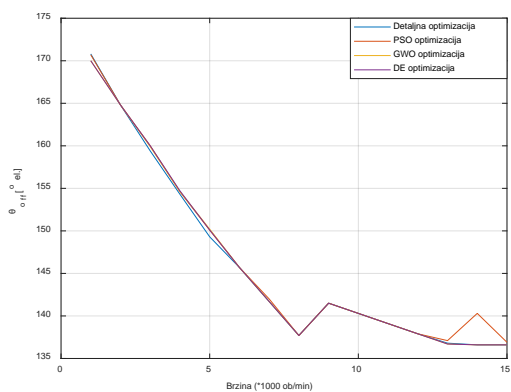
brzina (ob/min)	Detaljna optimizacija			PSO optimizacija			GWO optimizacija			DE optimizacija		
	$P$	$\theta_{on}$	$\theta_{off}$	$P$	$\theta_{on}$	$\theta_{off}$	$P$	$\theta_{on}$	$\theta_{off}$	$P$	$\theta_{on}$	$\theta_{off}$
1000	51.6717	52.9	170.8	51.6704	52.9	170.7	51.5985	52.3	170	51.5985	52.3	170
2000	100.7224	48.8	164.8	100.7224	48.8	164.8	100.7224	48.8	164.8	100.7224	48.8	164.8
3000	146.8945	44.5	159.4	146.917	45.1	160	146.9148	45.1	159.9	146.917	45.1	160
4000	190.3141	40	154.3	190.3944	40.4	154.6	190.3944	40.4	154.6	190.397	40.4	154.7
5000	231.0088	35	149.3	231.2942	36	150.1	231.2774	36.1	150.2	231.2942	36	150.1
6000	269.7591	31.3	145.7	269.7591	31.3	145.7	269.7591	31.3	145.7	269.7591	31.3	145.7
7000	305.9301	26.7	141.7	305.9024	27	142	305.9301	26.7	141.7	305.9301	26.7	141.7
8000	339.8903	21.8	137.7	339.8903	21.8	137.7	339.8903	21.8	137.7	339.8903	21.8	137.7
9000	347.9513	17.3	141.5	347.9513	16.7	141.5	347.9513	16.3	141.5	347.9513	16.1	141.5
10000	346.8311	13	140.3	346.8311	13	140.3	346.8311	6.8	140.3	346.8311	7.8	140.3
11000	347.6604	4	139.1	347.6604	6.5	139.1	347.6604	0	139.1	347.6604	0	139.1
12000	350.6813	2.8	137.9	350.6813	1.2	137.9	350.6813	0	137.9	350.6813	0	137.9
13000	353.2989	0	136.8	346.8117	1	137.1	354.0189	0.1	136.7	354.0189	0.1	136.7
14000	329.2948	0	136.6	326.6852	0.2	140.3	329.2948	0	136.6	329.2948	0	136.6
15000	307.2529	0	136.6	300.3846	1	136.9	307.2529	0	136.6	307.2529	0	136.6



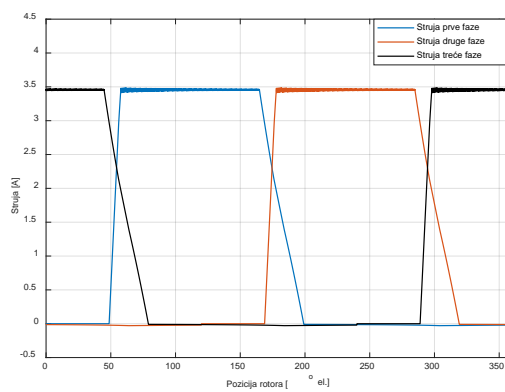
Slika 3. Maksimalne izlazne snage motora



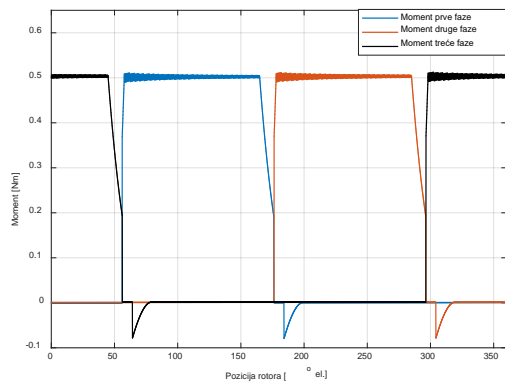
Slika 4. Optimalne vrijednosti uglova uključnja



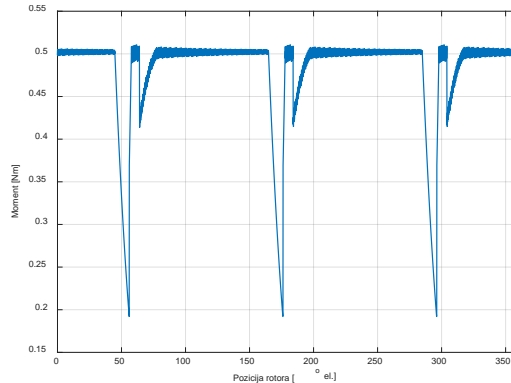
Slika 5. Optimalne vrijednosti uglova isključenja



Slika 6. Struje sve tri faze za brzinu 2000 ob/min

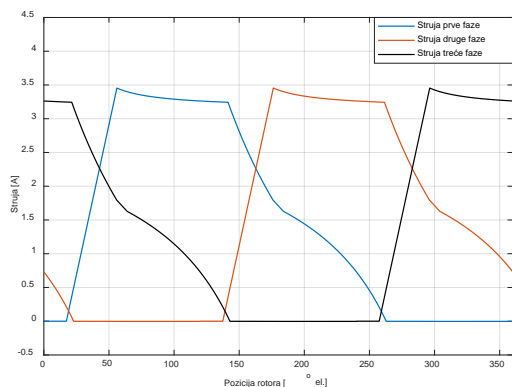


Slika 7. Momenti sve tri faze za brzinu 2000 ob/min

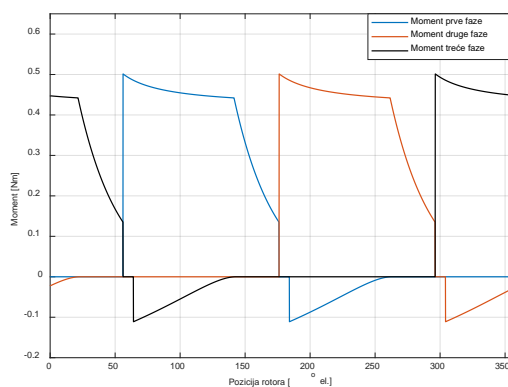


Slika 8. Ukupni moment za brzinu 2000 ob/min

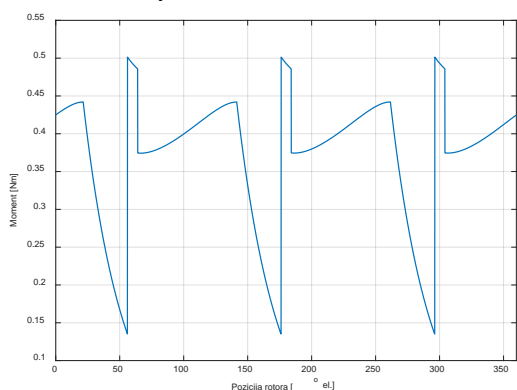




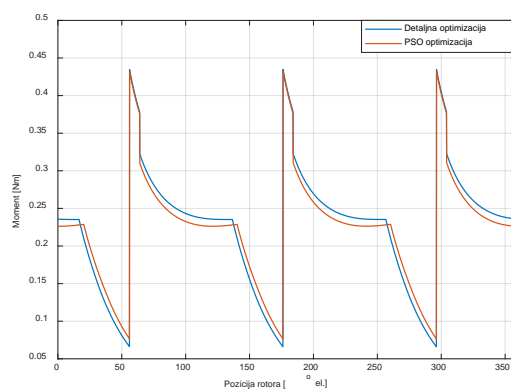
Slika 9. Struje sve tri faze za brzinu 9000 ob/min



Slika 10. Momenti sve tri faze za brzinu 9000 ob/min



Slika 11. Ukupni moment za brzinu 9000 ob/min



Slika 12. Poređenje ukupnog momenta za brzinu 14000 ob/min

## 5. ZAKLJUČAK

Predmet analize ovog rada jeste primjena savremenih optimizacionih metoda koje se baziraju na metaheurističkim algoritmima u cilju određivanja vrijednosti uglova uključenja i isključenja PRM-a pri kojima se dobija maksimalna izlazna snaga. Kako bi se pokazalo da se razmotreni metaheuristički algoritmi mogu uspješno primijeniti za rješavanje problema optimizacije upravljačkih uglova, izvršene su simulacije i prikazane su zavisnosti maksimalne snage i optimalnih uglova uključenja i isključenja u funkciji brzine obrtanja. Sve funkcionalne zavisnosti su dobijene nezavisno korišćenjem tri opisana algoritma. Dobijene karakteristike snage i optimalnih upravljačkih uglova za sve tri optimizacione metode su gotovo iste i odgovaraju karakteristikama utvrđenim pomoću detaljne optimizacije. Upoređujući algoritme sa aspekta brzine izvršavanja, vrijeme potrebno za optimizaciju korišćenjem PSO i GWO algoritma je oko 3 minuta (kada je maksimalan broj iteracija jednak 200, a veličina populacije 100), dok je vrijeme potrebno za izvršavanje DE algoritma nešto veće i iznosi oko 5 minuta, čak i kada je populacija manja nego kod ostala dva algoritma (maksimalan broj iteracija je takođe jednak 200, ali je veličina populacije 50).

## 6. LITERATURA

- [1] M. Čalasan, "Upravljanje prekidačkim reluktantnim generatorom i topologije energetskog pretvarača za rad u kontinualnom režimu", Doktorska disertacija, Podgorica, jun 2017. godine
- [2] Ž.J. Grbo, "Energetski pretvarači za prekidački reluktantni motor", Doktorska disertacija, Beograd, 2007. godine
- [3] V.P. Vujičić, "Minimization of Torque Ripple and Copper Losses in Switched Reluctance Drive," *IEEE Trans. Power Electr.*, vol. 27, no. 1, pp. 388–399, 2012.
- [4] A. Anuchin, M. Lashkevich, D. Aliamkin, and F. Briz, "Achieving maximum torque for switched reluctance motor drive over its entire speed range," *19th Int. Symp. Power Electron. Ee 2017*, 2017.

- [5] C. Mademlis and I. Kioskeridis, "Performance optimization in switched reluctance motor drives with online commutation angle control," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 18, no. 3, pp. 448–457, 2003.
- [6] Y. Sozer and D.A. Torrey, "Optimal turn-off angle control in the face of automatic turn-on angle control for switched-reluctance motors," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 1, no. 3, pp. 395–401, 2007.
- [7] Y. Z. Xu, R. Zhong, L. Chen, and S. L. Lu, "Analytical method to optimise turn-on angle and turn-off angle for switched reluctance motor drives," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 6, no. 9, pp. 593–603, 2012.
- [8] M. V. Zaharia, A. A. Laczko, A. A. Pop, M. M. Radulescu, and F. Gillon, "Optimal commutation angles of a switched reluctance motor/generator," *2015 10th Int. Conf. Ecol. Veh. Renew. Energies, EVER 2015*, 2015.
- [9] X. Zan, Y. Huo, and J. Gu, "Optimization research of turn-on angle and turn-off angle based on switched reluctance starter/generator system," *Can. Conf. Electr. Comput. Eng.*, vol. 2015–June, no. June, pp. 864–869, 2015.
- [10] E. F. I. Raj, "Neural Network Based Control for Switched Reluctance Motor Drive," *IEEE International Conference on Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology*, 2013.
- [11] C. Shang, D. S. Reay, and B. W. Williams, "Commutating switched reluctance motors efficiently via CMAC neural network with learning rate function," *Proc. 1997 Am. Control Conf. (Cat. No.97CH36041)*, pp. 237–241, 1997.
- [12] B. Anvari, M. Kaya, S. Englebretson, S. Hajimirza, and H. A. Toliyat, "Surrogate-Based Optimization of Firing Angles for Switched Reluctance Motor," *2018 IEEE Transp. Electrification Conf. Expo, ITEC 2018*, no. 1, pp. 359–365, 2018.
- [13] U.-Y. HUH and T.-G. LEE, "Fuzzy Logic Based Switching Angle Controller for Sr Motor Speed Control," *Ind. Electron. 1995. ISIE '95., Proc. IEEE Int. Symp.*, pp. 809–814, 1995.
- [14] H. M. Cheshmehbeigi, S. Yari, a R. Yari, and E. Afjei, "Self-Tuning Approach to Optimization of Excitation Angles for Switched- Reluctance Motor Drives Using Fuzzy Adaptive Controller," *2009 13th Eur. Conf. Power Electron. Appl.*, pp. 1–10, 2009.
- [15] J. W. Jiang, B. Bilgin, B. Howey, and A. Emadi, "Design optimization of switched reluctance machine using genetic algorithm," *Proc. - 2015 IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. IEMDC 2015*, pp. 1671–1677, 2016.
- [16] B. Mirzaeian-Dehkordi and P. Moallem, "Genetic algorithm based optimal design of switching circuit parameters for a switched reluctance motor drive," *2006 Int. Conf. Power Electron. Drives Energy Syst. PEDES '06*, vol. 1, no. 2, 2006.
- [17] H. Yahia, N. Liouane, and R. Dhifaoui, "Multi-Objective differential evolution-based performance optimization for switched reluctance motor drives," *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 21, no. 4, pp. 1061–1076, 2013.
- [18] L. Griffin, F. Fleming, and C. S. Edrington, "A Particle Swarm Optimization Based Maximum Torque per Ampere Control for a Switched Reluctance Motor," *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2014.
- [19] V. Vasan Prabhu, V. Rajini, M. Balaji, and V. Prabhu, "A comparative study of operating angle optimization of switched reluctance motor with robust speed controller using PSO and GA," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 551–559, 2015.
- [20] Y. del Valle, G. K. Venayagamoorthy, S. Mohagheghi, J.-C. Hernandez, and R. G. Harley, "Particle Swarm Optimization: Basic Concepts, Variants and Applications in Power Systems," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 12, no. 2, pp. 171–195, 2008.
- [21] C. H. Yang, C. J. Hsiao, and L. Y. Chuang, "Linearly Decreasing Weight Particle Swarm Optimization with Accelerated Strategy for Data Clustering," *IAENG International Journal of Computer Science*, vol. 37, no. 3, August 2010.
- [22] F. Marini and B. Walczak, "Particle swarm optimization (PSO). A tutorial," *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, vol. 149, pp. 153–165, 2015.
- [23] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 69, pp. 46–61, 2014.
- [24] S. Das and P. N. Suganthan, "Differential Evolution: A Survey of the State-of-the-Art," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 15, no. 1, pp. 4–31, 2011.
- [25] H. K. Kim, J. K. Chong, K. Y. Park, and D. A. Lowther, "Differential evolution strategy for constrained global optimization and application to practical engineering problems," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 4, pp. 1565–1568, 2007.