

Pengaruh Jarak Air Gap pada Performance Motor Brushless Direct Current Jenis Exterior Rotor

Thorikul Huda¹, Nita Indriani P², M Efrizal Gozali³

¹ Teknik Elektro, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan. Email: thorikul.h@itk.ac.id

² Teknik Elektro, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan.. Email: nitaindriani@itk.ac.id

³ Teknik Elektro, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan. Email: efrizal.gozali@gmail.com

Abstract

Electric motors today have become an important part in technological developments. One type of electric motor that has been and continues to be developed at this time is brushless direct current (BLDC). BLDC is generally applied as an actuator on electric vehicles. The development of electric vehicles make BLDC motor more varied. This research analyze the influence of air gap distance on the design performance of BLDC motor with exterior rotor type. The BLDC motor has rated voltage 48 V and input current 23A.

Keywords: Electric motor, BLDC, Slot, Pole

Abstrak

Motor listrik saat ini telah menjadi bagian penting dalam perkembangan teknologi. Salah satu jenis motor listrik yang telah dan terus berkembang saat ini yaitu motor brushless direct current (BLDC). Motor BLDC pada umumnya diaplikasikan sebagai penggerak pada kendaraan listrik. Semakin berkembangnya kendaraan listrik membuat motor BLDC semakin bervariasi. Pada penelitian kali ini akan membahas tentang pengaruh jarak air gap pada *performance* desain motor BLDC jenis exterior rotor. Motor BLDC memiliki rating tegangan 48 volt DC dan arus masukan 23 A.

Kata Kunci: Motor Listrik, BLDC, Slot, Pole.

1. Pendahuluan

Motor listrik merupakan alat yang dapat mengubah energi elektrik menjadi energi mekanik menggunakan prinsip elektromagnetik. Motor listrik pertama kali ditemukan oleh ilmuwan Michael Faraday pada tahun 1821. Dari berbagai macam jenis motor listrik yang telah dikembangkan saat ini ada sebuah motor listrik *Brushless Direct Current* (BLDC) jenis *exterior-rotor*. Motor listrik *brushless* adalah motor tanpa *brush/sikat*, *slip ring*, atau *mechanical commutator* (Hendershot, 1994).

Salah satu perkembangan motor listrik berjenis BLDC digunakan pada sepeda listrik. Sepeda listrik menggunakan motor listrik yang merupakan komponen utama sebagai penggerak sepeda. Dilansir pada situs EVELO yang merupakan salah satu perusahaan sepeda listrik dunia menyatakan bahwa daya motor listrik yang digunakan pada sepeda listrik sangat bervariasi antara 200 watt sampai dengan 1.000 watt atau lebih. Sedangkan daya motor sepeda listrik pada peraturan standar di U.S. yaitu 750W.

Pada penelitian ini akan dibahas mengenai pengaruh kombinasi jarak air gap pada *performance* motor listrik yang digunakan sebagai penggerak pada sepeda listrik. Jarak *airgap* tergantung pada pemilihan motor yang akan dirancang, di mana ukuran *airgap* 0,005" sampai dengan 0,01" direkomendasikan untuk motor dengan skala kecil. Sedangkan motor dengan skala sedang ukuran *airgap* sekitar 0,015" sampai dengan 0,02" dan ukuran *airgap* 0,025" sampai dengan 0,035" direkomendasikan untuk motor dengan skala besar (Hendershot, 1994). Motor listrik yang akan didesain yaitu motor listrik dengan tipe BLDC dengan daya 1000 watt jenis *exterior-rotor* yang selanjutnya dapat digunakan sebagai aktuator.

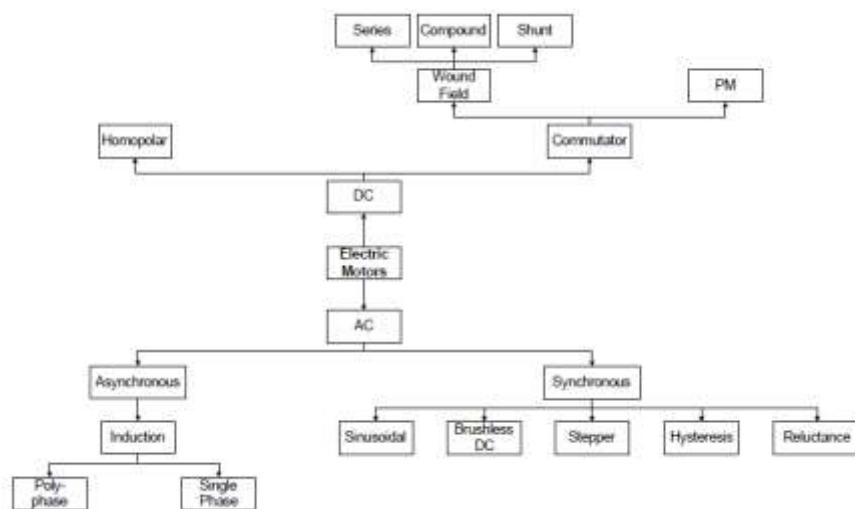
2. Dasar Teori

2.1 Motor *Brushless DC* (BLDC)

Motor listrik telah banyak berkembang semenjak pertama kali dikenalkan oleh Michael Faraday. Pemanfaatan motor listrik sebagai penggerak banyak kita jumpai dalam kehidupan sehari-hari. Berbagai macam jenis motor listrik telah dikembangkan oleh para peneliti mulai dari konstruksi, daya yang dihasilkan, karakteristik motor tersebut dan lain sebagainya yang disesuaikan dengan kebutuhan masing-masing.

2.1.1 Konsep Umum

Motor Listrik merupakan sebuah alat yang digunakan untuk mengkonversikan energi elektrik berupa tegangan dan arus ke energi mekanik berupa torsi dan kecepatan putar. Banyak jenis dari motor listrik yang ada dan telah dikembangkan dengan berbagai kebutuhan yang berbeda. Salah satunya adalah motor listrik dengan tipe *brushless dc* (BLDC). Klasifikasi dari mesin listrik yang ada dapat dilihat pada Gambar 1.

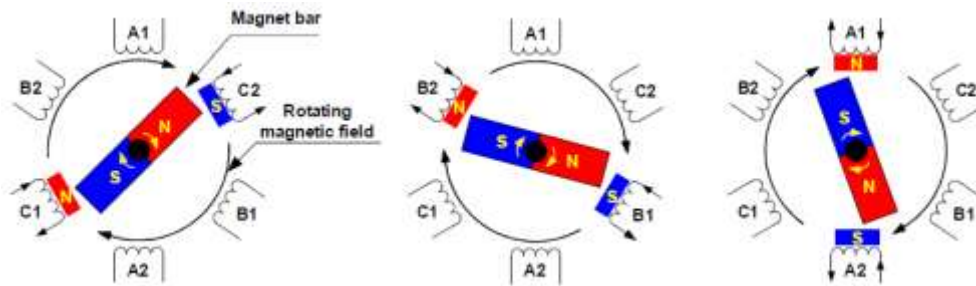


Gambar 1 : Klasifikasi Mesin Listrik
(Hanselman, 2017)

Motor listrik BLDC merupakan jenis motor sinkron yang menggunakan kontroler khusus yaitu berupa inverter di mana input dari sumber berupa tegangan arus searah atau *direct current* (DC) dan diubah menjadi arus bolak balik yang digunakan untuk mengontrol motor. Aplikasi dari motor jenis ini pada umumnya digunakan pada kendaraan listrik seperti sepeda listrik, kipas dengan variasi kecepatan, CD player, serta pada peralatan otomatisasi industri (Zhao, 2011).

2.1.2 Prinsip Kerja

Prinsip kerja motor BLDC didasarkan pada daya tarik atau tolak antara kutub magnet. Menggunakan motor tiga fasa yang ditunjukkan pada Gambar 2, proses dimulai ketika arus mengalir melalui salah satu dari tiga gulungan stator dan menghasilkan kutub magnet yang menarik magnet permanen terdekat dari kutub yang berlawanan. Rotor akan bergerak sesuai ke arah belitan stator selanjutnya yang terinduksi. Arus sinusoidal 3 fasa yang diberikan pada belitan stator menyebabkan akan menginduksi setiap belitan secara berurutan dan menyebabkan medan putar. Hal ini akan menyebabkan rotor bergerak berputar mengikuti medan putar dan menghasilkan kecepatan putar dan torsi. Besarnya torsi tergantung pada amplitudo arus dan jumlah putaran pada gulungan stator, kekuatan dan ukuran magnet permanen, celah udara antara rotor dan gulungan, dan panjang lengan berputar (Hanselman, 2017).



Gambar 2 : Prinsip Kerja Motor Listrik
(Hanselman, 2017)

2.2 Konstruksi

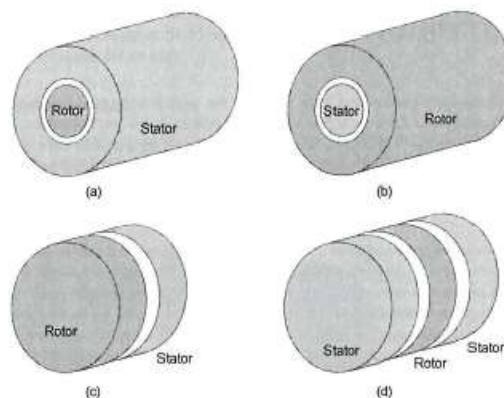
Pada perancangan motor listrik jenis BLDC terdapat tiga komponen yang harus diperhatikan pada konstruksi motor listrik yaitu komponen mekanik, magnetik dan elektrik.

2.2.1 Komponen Mekanik

Motor listrik terdiri dari 2 bagian utama yaitu bagian stator dan bagian rotor. Bagian stator merupakan bagian pada motor listrik yang diam, sedangkan bagian rotor merupakan bagian yang berputar. Desain mekanik motor brushless DC mempengaruhi performa dari motor yang akan dirancang.

2.2.2 Stator dan Rotor

Pada motor *brushless*, kumparan atau belitan tembaga selalu terdapat pada bagian stator. Sedangkan pada rotor terdapat magnet permanen. Di antara rotor dan stator terdapat celah udara yang biasa disebut dengan *airgap*. Ukuran *airgap* tergantung pada pemilihan motor yang akan dirancang, di mana ukuran *airgap* 0,005" sampai dengan 0,01" direkomendasikan untuk motor dengan skala kecil. Sedangkan motor dengan skala sedang ukuran *airgap* sekitar 0,015" sampai dengan 0,02" dan ukuran *airgap* 0,025" sampai dengan 0,035" direkomendasikan untuk motor dengan skala besar (Hendershot, 1994). Ada beberapa kombinasi posisi antara stator dengan rotor yang memungkinkan. Hal itu dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3: Kombinasi-Kombinasi Posisi Antara Stator Dengan Rotor
(Hanselman, 2017)

Berdasarkan arah fluks-fluks magnetik pada motor listrik terdapat 2 jenis motor yaitu tipe *axial-flux* dan *radial-flux*. Pada tipe *radial-flux* magnet permanen diletakkan pada rotor yang dikopling dengan stator. Fluks magnetik dihasilkan mengarah secara radial dan diarahkan agar memotong belitan stator yang disusun di sisi stator, ditunjukkan pada Gambar 3.(a),(b). Sedangkan pada tipe *axial-flux*, rotor dan stator berbentuk disk, di mana magnet permanen diletakkan di permukaan rotor untuk menghasilkan fluks magnetik yang berarah tidak menyebar, melainkan hanya secara aksial dan paralel dengan shaft, ditunjukkan pada Gambar 3.(c),(d).

Tipe motor *radial-flux* terbagi atas dua jenis. Ketika posisi rotor berada di dalam dan stator berada di luar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.(a), maka motor tersebut berjenis *interior-rotor motor*, sedangkan pada posisi yang sebaliknya pada Gambar 2.3.(b) motor tersebut berjenis *exterior-rotor motor*.

Setiap jenis motor *brushless* tersebut memiliki karakteristik yang berbeda-beda. Untuk jenis motor *axial-flux* memiliki karakteristik berkecepatan rendah dengan torsi yang konstan. Jenis ini sesuai untuk kebutuhan beban dengan sedikit variasi perubahan kecepatan. Ketika kebutuhan beban dengan torsi tinggi dan berkecepatan rendah maka direkomendasikan untuk menggunakan motor dengan jenis *interior-rotor motor*. Namun, untuk beban dengan kebutuhan kecepatan tinggi maka jenis *exterior-rotor motor* dapat digunakan (Hendershot, 1994).

2.2.3 Jumlah Fasa

Motor brushless dc pada umumnya memiliki tiga fasa. Namun hal ini bukan berarti tidak ada motor brushless dc yang memiliki jumlah fasa selain tiga. Motor brushless dc pertama kali dibuat dan beredar di pasaran pada awal tahun 1960 yaitu dengan empat fasa buatan perusahaan Siemens. Walaupun pada saat ini terdapat jenis motor brushless dengan dua fasa lebih populer digunakan pada kipas dengan skala kecil. Hal ini disebabkan komponen *hall switch* yang dibutuhkan hanya satu dan dua *power transistors*. Sehingga pada proses produksinya lebih murah dibandingkan menggunakan tiga fasa atau lebih (Hendershot, 1994). Penggunaan motor brushless dengan tiga fasa lebih umum digunakan. Motor brushless dengan tiga fasa memiliki fleksibilitas dalam konfigurasi belitan wye maupun *delta*. Selain itu juga lebih mudah dalam perancangannya.

2.2.4 Slot dan Pole

Pemilihan jumlah *slot* dan *pole* berdasarkan beberapa faktor antara lain (Hendershot, 1994):

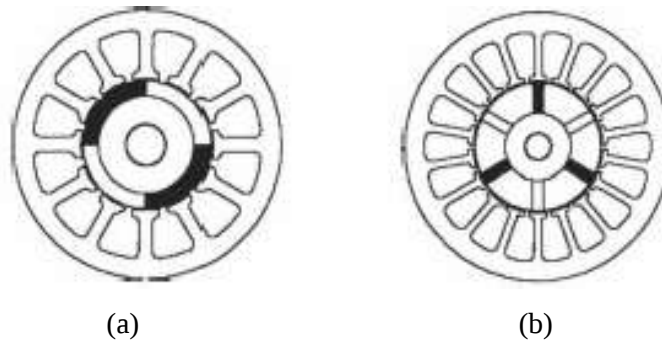
1. Magnet material
2. Jenis motor brushless
3. Produksi motor
4. Kecepatan putar dan
5. Inersia motor yang dibutuhkan

Dengan memperhatikan faktor-faktor di atas maka dapat ditentukan jumlah slot dan pole yang sesuai dengan kebutuhan motor brushless. Sebagai contoh penggunaan motor brushless dengan jumlah pole dan slot yang banyak digunakan untuk motor berkecepatan rendah. Sedangkan pemilihan slot dan pole dalam jumlah sedikit untuk motor berkecepatan tinggi. Aturan umum pada motor brushless dengan tiga fasa yaitu jumlah slot bernilai kelipatan tiga dan jumlah pole bernilai kelipatan dua.

2.3 Komponen Magnetik

Magnet permanen merupakan material logam yang dapat menghasilkan medan magnet secara alami dan sukar untuk dihilangkan. Banyak jenis material magnet permanen yang ada dan dengan berbagai macam bentuk yang berbeda. Magnet permanen merupakan salah satu komponen terpenting pada motor brushless DC.

Seperti yang telah dijelaskan bahwa magnet permanen pada motor brushless diletakan pada rotor. Terdapat berbagai cara dalam memposisikan magnet permanen pada motor. Berdasarkan posisi magnet permanen pada rotor maka jenis rotor terbagi atas dua jenis yaitu *surface-magnet rotor* ditampilkan pada Gambar 4(a) dan *embed-magnet rotor* ditampilkan pada Gambar 4(b)(Hendershot, 1994). Pemilihan jenis rotor tergantung pada kondisi dan kebutuhan dari motor yang akan dirancang.



Gambar 4: Jenis Rotor Berdasarkan Posisi Magnet
(Hendershot, 1994).

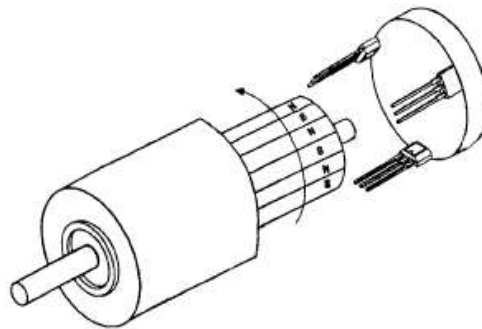
Magnet permanen digunakan pada motor brushless sebagai sumber fluks yang akan mempengaruhi kinerja dari motor brushless. Pemilihan magnet permanen yang digunakan pada motor brushless tergantung pada kebutuhan motor yang akan dibuat. Di mana setiap jenis magnet permanen memiliki performa yang berbeda-beda tergantung bahan materialnya. Jenis-jenis magnet permanen yang pada umumnya digunakan pada motor brushless antara lain *alnico magnet*, *ferrite magnet* dan *rare-earth magnet* (Kenzo, 1985).

2.4 Komponen Elektrik

2.4.1 Hall Elements

Untuk mengetahui posisi dari rotor pada motor brushless dc dapat dilakukan dengan menggunakan sensor posisi. Sensor posisi tersebut akan memberikan informasi kepada driver tentang posisi sudut rotor. Jenis-jenis sensor posisi yang dapat digunakan pada motor brushless dc antara lain *hall elements*, *resolver* atau *encoders*.

Hall elements merupakan jenis sensor medan magnet dengan menghasilkan tegangan ketika mendeteksi medan magnet disekitarnya. Tegangan yang dihasilkan ini akan diartikan oleh *driver* sehingga dapat menentukan posisi sudut dari rotor. Sensor posisi yang dibutuhkan pada motor brushless dc dengan tiga fasa sebanyak tiga *hall elements*, ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5: Posisi Hall Elements Pada Motor Brushless DC
(Zhao, 2011)

2.5 Belitan

Belitan pada motor brushless terdapat pada bagian stator di mana memiliki aturan dalam konfigurasi. Belitan pada motor brushless dengan jenis interior-rotor memiliki kesamaan seperti pada motor induksi tiga fasa. Sedangkan pada motor jenis exterior-rotor memiliki kesamaan dengan belitan jangkar pada motor DC. Kedua konfigurasi belitan motor brushless tersebut memiliki aturan yang sama.

Dalam melakukan perancangan belitan maka dikenal istilah *coil span* atau *winding pitch*. *Coil span* maksimum ($\sigma_{\max}$) harus bernilai minimum dari bilangan integer (next lowest integer) yang diperoleh dari pembagian antara jumlah slots (N_{slots}) dengan jumlah poles ($2p$). Hal ini ditunjukkan melalui persamaan 1.

$$\sigma_{\max} = \text{Max coil span (slots)} = \text{NLI} \left[\frac{\text{Stator slots } (N_{\text{slots}})}{\text{Rotor poles } (2p)} \right] \quad (1)$$

Di mana NLI adalah “Next Lowest Integer” yang berarti pembulatan minimum dari hasil pembagian antara jumlah slot dengan jumlah *pole*.

Setelah mendapatkan nilai $\sigma_{\max}$ dari persamaan 1 maka dapat ditentukan nilai dari bilangan pecahan (ε) melalui persamaan 2.2 dan nilai dari coil span (σ). Peimilihan nilai coil span bebas dengan aturan lebih kecil atau sama besar dengan $\sigma_{\max}$.

$$\frac{N_{\text{slots}}}{2p} = \sigma_{\max} + \varepsilon \quad (2)$$

Nilai dari bilangan pecahan antara 0 dengan 1. Dengan telah diketahui nilai bilangan pecahan maka dapat ditentukan urutan belitan perfasanya. Aturan untuk menentukan urutan belitan perfasa ditentukan melalui nilai dari *slots foward* (S_f). Nilai dari *slots foward* dapat diperoleh melalui persamaan 3.

$$S_f = \begin{cases} \sigma_{\max} + 1, & \text{jika } \varepsilon > 0,5 \\ N_{ss} - \sigma_{\max}, & \text{jika } \varepsilon \leq 0,5 \end{cases} \quad (3)$$

Di mana N_{ss} adalah *slots per section* yang merupakan nilai pembagian dari jumlah slot dengan *highest common factor* (HCF) dari *coils per phase* dan jumlah pasang kutub (p), ditunjukkan pada persamaan (4).

$$N_{ss} = \frac{N_{\text{slots}}}{\text{HCF}[C_{ph,p}]} \quad (4)$$

Aturan tersebut digunakan agar tidak terjadi kesalahan dalam peletakan fasa atau *phase error* dalam menentukan urutan belitan.

Terdapat dua cara dalam menghubungkan belitan per coil pada setiap fasa yaitu dengan menghubungkannya secara seri, paralel atau gabungan antara seri dan paralel. Pada umumnya hubungan belitan per coil pada motor yaitu dengan hubungan seri dikarenakan jenis ini adalah cara termudah untuk diterapkan.

Posisi awal slots untuk fasa pertama dilakukan secara acak. Setelah usai menentukan urutan belitan pada fasa pertama, maka untuk menentukan posisi slot awal fasa ke dua dan ke tiga harus ditentukan nilai dari *offset*. Jika fasa pertama dimulai pada slot pertama maka fasa kedua dimulai pada slot ke $1 + \text{offset}$. Nilai *offset* merupakan bilangan bulat positif dan dapat ditentukan melalui persamaan 5.

$$\text{Offset} = \frac{2}{3} \times \frac{N_{\text{slots}}}{2p} + k \times \frac{N_{\text{slots}}}{p}, \quad k = 1, 2, 3 \dots \quad (5)$$

3. Metode Penelitian

3.1. Inisialisasi Awal

Motor listrik yang akan dirancang yaitu motor brushless dc. Parameter awal motor BLDC yang akan dirancang antara lain :

1. Jenis motor yaitu *brushless dc exterior-rotor*;
2. Daya input 1000 watt;

3. Tegangan sumber dc 48 V, pemilihan nilai tegangan sumber didasari pada ketersediaan driver dari brushless dc yang dimiliki oleh program studi;
4. Kecepatan rating yang diinginkan yaitu 5000rpm;
5. Permanen magnet yang digunakan berjenis neodymium iron boron (NdFeB) berbentuk batang dengan ukuran panjang 30 mm, lebar 10 mm dan ketebalan 4 mm; pemilihan jenis neodymium iron boron dikarenakan jenis ini memiliki performa yang baik untuk digunakan pada motor dibandingkan jenis ferrite dan alnico dan pemilihan bentuk serta ukuran didasari pada kesedian magnet permanen di pasaran dan faktor biaya.

3.2. Rancangan Konstruksi Motor

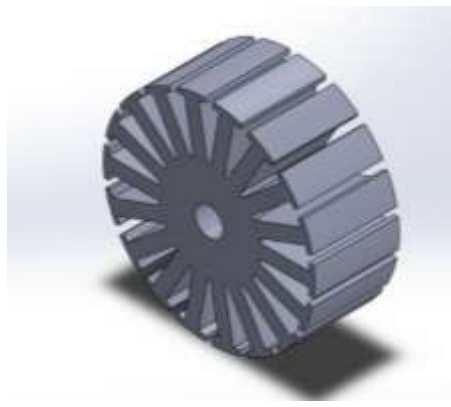
Desain stator dan rotor dari prototipe motor *brushless dc* berdasarkan referensi (Hendershot, 1994),(Kenzo, 1985) dan (Gieras, 2002) dengan ukuran yang disesuaikan pada Tabel 1. Desain dari stator sendiri dapat dilihat pada Gambar 6 dan gambar 7 sedangkan desain dari rotor ditampilkan pada Gambar 8 dan 9. Konfigurasi motor BLDC ini dengan jumlah slot 24 dan pole 18, untuk dimensi dari bagian – bagian yang motor yang lain, sebagai berikut:

Tabel 1: Dimensi Bagian – Bagian dari Rancangan BLDC

Parameter	Dimensi (mm)
Diameter Luar Rotor	87
Diameter Dalam Rotor	77
Diamter Luar Stator	75
Diameter Shaft	10
Magnet	30x10x4



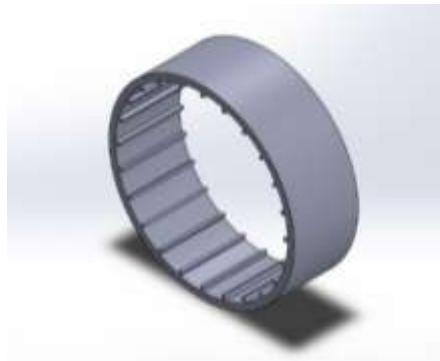
Gambar 6: Konstruksi Stator Tampak Depan



Gambar 7: Konstruksi Stator 3D



Gambar 8: Konstruksi Rotor Tampak Depan



Gambar 9: Konstruksi Rotor 3D

3.3. Perancangan Belitan

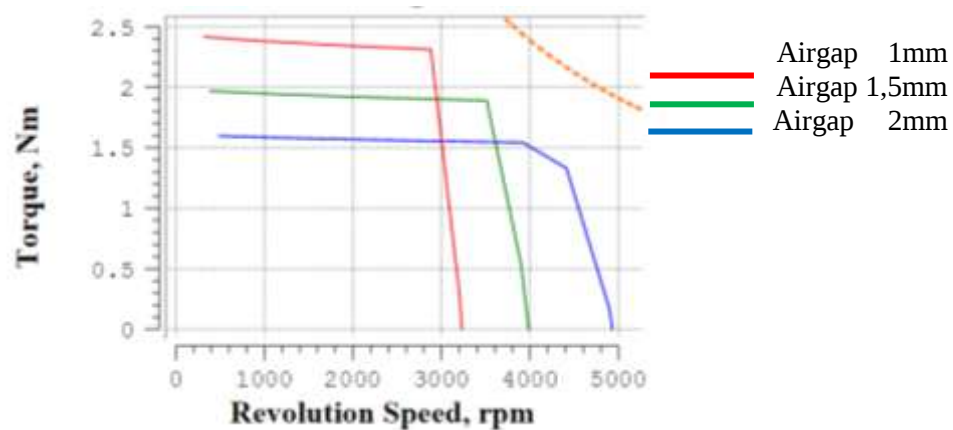
Komponen elektrik yang menjadi bagian penting dalam perancangan motor BLDC adalah belitan yang terdapat pada stator. Belitan tersebut berfungsi sebagai penghantar arus dan akan memagnetisasi *teeth* sehingga menjadi magnet. Pada penelitian ini konduktor belitan menggunakan ukuran 0,7mm dengan jumlah belitan 7 belitan di tiap *teeth*. Dari belitan akan muncul parameter elektrik yang dapat dilihat pada table 2.

Tabel 2: Parameter Elektrik BLDC

Parameter	Nilai	Satuan
Induktansi	6,258e-05	Henry
Resistansi	0,1427	Ohm
Konstanta torsi (Kt)	0,1172	Nm/A
Konstanta tegangan (Kv)	0,1172	V rad/s

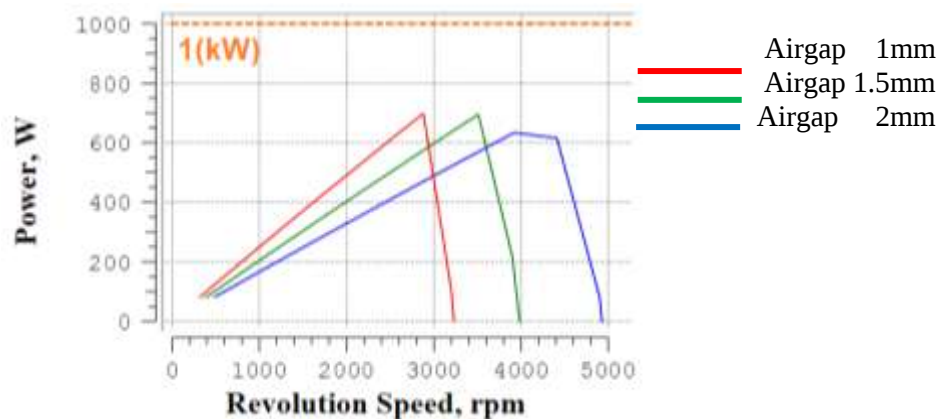
4. HASIL PENGUJIAN

Pengujian pada desain BLDC motor dilakukan dengan melakukan variasi *air gap*. Jarak *airgap* tergantung pada pemilihan motor yang akan dirancang, di mana ukuran *airgap* 0,005” sampai dengan 0,01” direkomendasikan untuk motor dengan skala kecil. Sedangkan motor dengan skala sedang ukuran *airgap* sekitar 0,015” sampai dengan 0,02” dan ukuran *airgap* 0,025” sampai dengan 0,035” direkomendasikan untuk motor dengan skala besar (Hendershot, 1994). Pada pengujian kali ini akan menguji *airgap* pada motor BLDC dengan jarak 1cm, 1,5cm, dan 2cm.



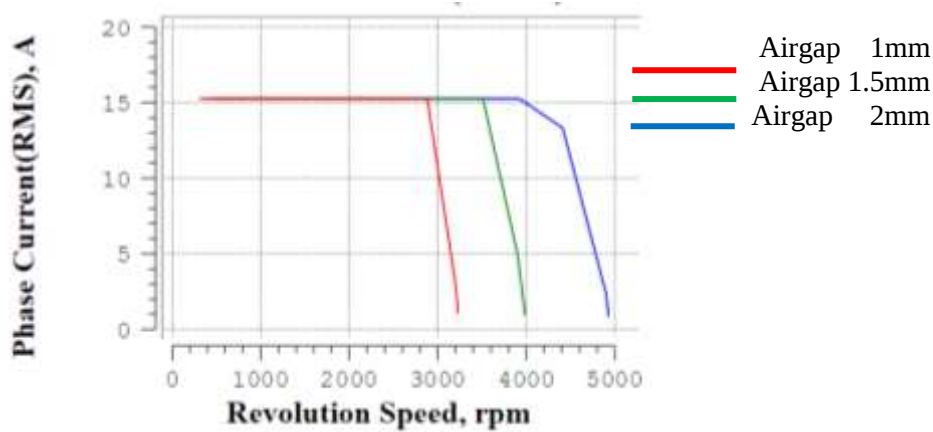
Gambar 10: Kurva Torsi Terhadap Kecepatan Dengan Variasi Air Gap

Kurva pada Gambar 10 merupakan kurva torsi terhadap kecepatan motor dengan variasi *air gap*. Dari hasil pengujian diperoleh bahwa kecepatan paling tinggi yaitu 4400rpm dicapai pada *airgap* 2 mm, sedangkan untuk *airgap* 1,5 mm mencapai kecepatan 4000 rpm, dan untuk *airgap* 1 mm hanya mencapai kecepatan disekitar 3200 rpm. Untuk torsi paling besar pada motor BLDC dengan *airgap* 1mm yaitu mencapai 2,3 Nm pada kecepatan 2900 rpm, sedangkan untuk *airgap* 1,5 mm memiliki torque 1,9 Nm pada kecepatan 3545 rpm dan yang paling rendah adalah pada *airgap* 2 mm dengan torsi 1,5 Nm pada kecepatan 3920 rpm. Dari hasil yang diperoleh diketahui bahwa pada kondisi jarak *air gap* yang sama, torsi dan kecepatan memiliki nilai yang berbanding terbalik. Jarak *air gap* akan mempengaruhi besar nya torsi yang dapat dihasilkan oleh sebuah motor, karena jarak *air gap* akan menentukan kerapatan fluks pada sebuah motor. Semakin dekat jarak *air gap*, maka fluks motor akan semakin rapat dan menyebabkan torsi motor meningkat.

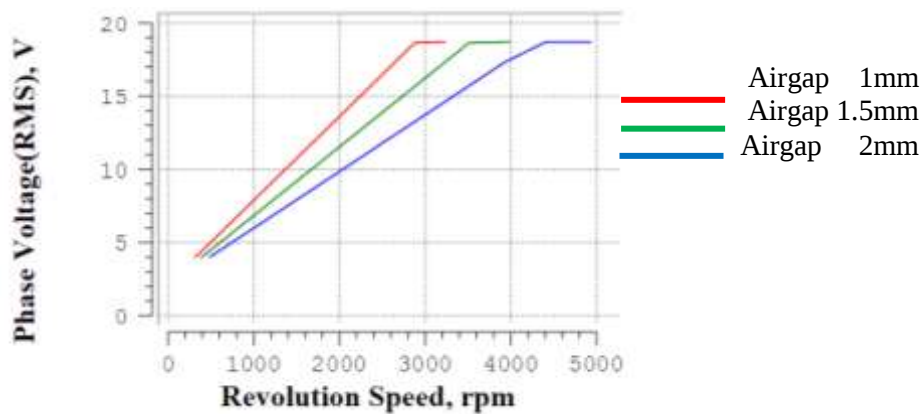


Gambar 11: Kurva Daya Terhadap Kecepatan

Jarak *airgap* juga berpengaruh pada daya input yang dibutuhkan motor. Pada kurva Gambar 11 terlihat daya yang paling besar digunakan pada konfigurasi motor dengan *airgap* 1 mm yaitu 723 Watt pada kecepatan 2857 rpm, pada *airgap* 1,5 mm mencapai puncak penggunaan daya sebesar 720 Watt pada kecepatan 3550 rpm dan pada *airgap* 2 mm mencapai puncak penggunaan daya sebesar 635 Watt pada kecepatan 3870 rpm.

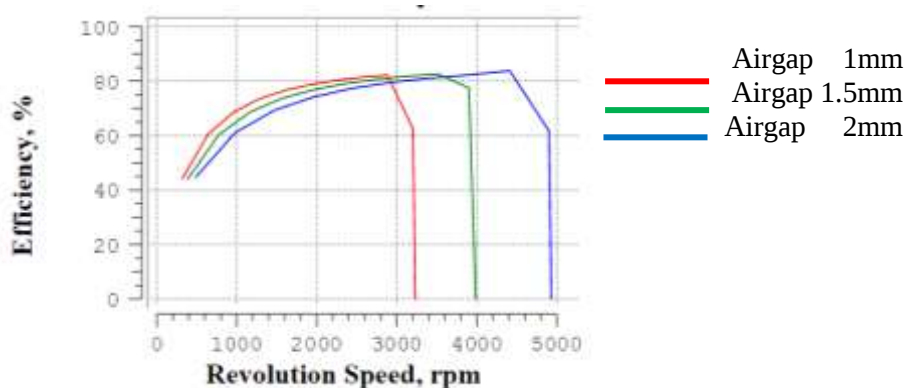


Gambar 12: Kurva Arus Terhadap Kecepatan



Gambar 13: Kurva Tegangan Terhadap Kecepatan

Dapat dilihat pada Gambar 12 bahwa arus fasa pada motor cenderung tetap saat range kecepatan tertentu, hal ini terjadi pada semua kondisi *air gap*. Saat arus menurun mendekati nol (dapat dikatakan bahwa beban motor berkurang), motor mencapai kecepatan paling maksimumnya. Gambar 13 menunjukkan bahwa tegangan dan kecepatan motor adalah linear. Dengan meningkatkan tegangan input, maka kecepatan motor akan meningkat.



Gambar 14: Kurva Efisiensi Terhadap Kecepatan

Pada percobaan berikutnya yaitu dilihat hubungan antara efisiensi dengan kecepatan motor. Efisiensi motor dihitung dengan membagi antara daya input dengan penjumlahan daya output dan total rugi-rugi daya pada motor. Daya input merupakan daya listrik sementara daya output berupa daya mekanik. Dari Gambar 14 terlihat bahwa efisiensi tertinggi dimiliki oleh motor dengan desain jarak *air gap* 1mm. Hal ini menunjukkan bahwa semakin kecil jarak *air gap* pada motor BLDC, maka akan

semakin tinggi efisiensi motor tersebut. Hal ini disebabkan karena semakin kecil *air gap* rugi-rugi daya pada motor akan semakin kecil. Efisiensi tertinggi pada semua kondisi desain *air gap* terjadi pada kecepatan tertentu, ketika kecepatan motor naik melewati kecepatan tersebut efisiensi dari motor BLDC semakin menurun.

5. Kesimpulan

Pada penelitian ini dapat disimpulkan pengaruh jarak *airgap* pada perancangan konfigurasi motor BLDC sebagai berikut:

1. Jarak *airgap* mempengaruhi torsi yang dihasilkan, dengan *airgap* yang semakin dekat maka torsi yang dihasilkan semakin besar. Hal ini terjadi karena semakin kecil jarak *air gap* maka semakin rapat fluks pada motor sehingga torsi semakin meningkat. Terlihat pada kurva Gambar 10 torsi paling besar pada *airgap* 1 mm sebesar 2,3 Nm sedangkan *airgap* 2 mm hanya menghasilkan torsi 1,5 Nm.
2. Jarak *air gap* juga mempengaruhi kecepatan motor BLDC. Semakin dekat *airgap* maka kecepatan akan lebih rendah dibanding dengan konfigurasi dengan *airgap* yang lebih besar, seperti ditunjukkan pada Gambar 11. Hal ini dikarenakan torsi dan kecepatan pada motor BLDC berbanding terbalik.
3. Tegangan input dari motor akan linear dengan kecepatan motor, dengan menaikkan tegangan input maka kecepatan motor akan meningkat.
4. Berdasarkan variasi jarak *air gap*, efisiensi tertinggi diperoleh saat jarak *air gap* terkecil yaitu 1mm. Pada kondisi *air gap* yang sama efisiensi terjadi pada kecepatan tertentu, ketika melewati kecepatan tersebut efisiensi dari motor BLDC akan semakin menurun.

Daftar Pustaka

- Hendershot, J.R., dan Miller, T.J.E., (1994), Design of Brushless Permanent Magnet Motors, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford.
- Kenjo, T. dan Nagamori, S., (1985), Permanent-Magnet and Brushless DC Motors, Clarendon Press, Oxford.
- Gieras, J.F., dan Wing, M. (2002), Permanent Magnet Motor Technology, Marcel Dekker, Inc., Switzerland.
- Zhao, J., dan Yu, Y., (2011), Brushless DC Motor Fundamentals Application Note, Monolitoc Power System, Inc, California, USA.
- Hanselman, D.C., (2003), Brushless Permanent Magnet Motor Design, 2nd Edition, , Magna Physics Publishing, USA.
- Evelo. (2017).
- How Electric Bikes Work. [online] tersedia di : <http://www.evelo.com/electric-bikes-101>
- Yulianta, A.D., Hadi, S.P., dan Suhayanto. (2015), "Pengendali Kecepatan Motor Brushless DC (BLDC) menggunakan logika fuzzy", Jurnal Sains, Teknologi dan Industri, Vol. 12, No. 2, hal. 248-254.

Losses Emission Dispatch Using Flower Pollination Algorithm with System Injection Smart Installation

Yun Tonce K.P^{1,*}, Vicky Mudeng¹, Andhika Giyantara¹, Firilia Filiana¹

¹Department of Electrical Engineering, Kalimantan Institute of Technology, Balikpapan.

*Email: yuntonce@itk.ac.id

Abstract

Technological developments in modern era can not be separated from the issue of the environment. The development of technology in electrical power supply by increasing the number of thermal power plants will certainly improve the combustion emissions resulted by these plants. Based on international agreements that related to environmental issues, it is necessary to have a solution to minimize the total emissions generated by the generating unit. Further, the greater distance between generating stations and load centers which caused the number of losses increase in the transmission system also need a new method to obtain the lowest losses. Therefore, in this paper, the authors show the simulation result of losses emission dispatch to get the lowest losses with minimal levels of emission in IEEE 30 bus using Flower Pollination Algorithm and Particle Swarm Optimization with smart installation injection system as the smart systems control.

Keywords: Emission Dispatch, Losses, Flower Pollination Algorithm, Particle Swarm Optimization, Optimal Power Flow.

Abstrak

Perkembangan teknologi di era modern tidak lepas dari isu tentang lingkungan. Perkembangan teknologi dalam pasokan tenaga listrik dengan meningkatkan jumlah pembangkit listrik thermal tentu akan meningkatkan emisi pembakaran yang dihasilkan oleh pembangkit ini. Berdasarkan kesepakatan internasional yang berkaitan dengan masalah lingkungan, perlu ada solusi untuk meminimalkan total emisi yang dihasilkan oleh unit pembangkit. Selanjutnya, jarak yang lebih jauh antara stasiun pembangkit dan pusat beban yang menyebabkan jumlah rugi - rugi meningkat pada sistem transmisi juga membutuhkan metode baru untuk mendapatkan rugi - rugi paling rendah. Oleh karena itu, dalam paper ini, penulis menunjukkan hasil simulasi pengaturan emisi dan rugi - rugi untuk mendapatkan tingkat rugi - rugi terendah dengan tingkat emisi minimal pada bus IEEE 30 dengan menggunakan Algoritma Penyebaran Bunga dan Optimasi Partikel Swarm dengan injeksi sistem instalasi cerdas sebagai sistem pengaturan cerdas.

Kata Kunci: Pengaturan Emisi, Algoritma Penyebaran Bunga, Optimasi Partikel Swarm, Optimasi Aliran Daya.

1. Introduction

Electricity is an important energy source for human life, almost all the existing activities require electrical energy. The growth of electricity needs in the community along with the rise of utilization of electrical energy to the customer's equipment. To supply the load demand, it is important to build power plants more than before. However, the construction of power plant certainly must not be neglecting environmental issues that accompany it which is residual substances that resulted from generation process. The generation of residual substances such as fly are very dangerous for the environ ashes, NO_x and SO_x gas will pollute the air. A new method can comply to minimize emissions production of combustion in power plants but produce optimum power generation remaining.

Furthermore, transmission system is very closely relation with transmission losses. Losses are the big problem both in transmission system and distribution system. The greater distance between generating

stations and load centers can produce the greater losses. Many methods already use to minimize losses.

The authors make innovation by performing simulation in MATLAB to get the minimum losses and minimum emission using Flower Pollination Algorithm method. Flower Pollinating Algorithm (FPA) basically uses the natural principle of pollinating itself, that is in a plant there are more than one flower and in the flower consists more than one pollen. FPA was discovered and developed by Dr. She Xin Yang at Cambridge University.

This flower pollination can occur with intermediaries bees, wind and insects. Pollination is common in the same flower or between flowers through such intermediaries. Pollination occurs within the same flower is known as a local pollination. Otherwise, the pollination occurs between flowers known as global pollination.

In this research the authors use comparison method to compare the main method namely Particle Swarm Optimization (PSO) where this method utilizes the natural principle of a flock of birds, animals herd behavior and the behavior of fish in the wild.

The authors goal were the comparison of the advance excellence to find minimum result of the losses and emission generated by each method. FPA was a main method and PSO was the comparison method.

2. Literature Review

2.1. Electric Power System

The electrical power system consists of three sub-parts:

1. Generation System

The Generation system is the main part of the electric power system, which serves as a producer, generating electrical energy generated from generator. Electrical energy generated due to changes in primary energy (fossil fuels, uranium, wind, water, etc.) into mechanical energy to drive turbines as prime movers in which the turbine has been coupled with generator.

2. Transmission Systems

The transmission system serves as a conductor to transfer electrical energy generated from the power system to the load centre. To transmit electrical energy generated, the voltage magnitude will be changed in substation and adjusted to the needs of the distribution system in distribution substation.

3. Distribution System

The distribution system is used to distribute electrical energy to consumers (industry, housing, market, etc.) with the suitable voltage magnitude.

2.2. Load Flow Analysis

The load flow analysis is the basic of planning and determination of the parameters where the power flow study will obtain active power, reactive power and losses as the main parameter to determine the objective function. The power flow analysis studies also provide information of load on the transmission line in the system, the voltage at each location to evaluate the performance of the power system regulation.

2.3. Load Flow Analysis

Optimal Power Flow is economic dispatch development and first proposed by Carpentier in 1962. Optimal power flow problems can be formulated as follows:

Objective Function

$$MinGC = \sum_{i \in G} C_i = \sum_{i \in G} (a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i) \quad (1)$$

Power Balance Equation

$$P_{Gm} - P_{Dm} = V_m \sum_{n=1}^{NB} V_n (G_{mn} \cos(\theta_m - \theta_n) + B_{mn} \sin(\theta_m - \theta_n)) \quad (2)$$

$$Q_{Gm} - Q_{Dm} = V_m \sum_{n=1}^{NB} V_n (G_{mn} \sin(\theta_m - \theta_n) + B_{mn} \cos(\theta_m - \theta_n)) \quad (3)$$

Limitation of Inequality Constraint
Generator Capacity Limit:

$$P_{Gi,\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,\max} \quad (4)$$

$$Q_{Gi,\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,\max} \quad (5)$$

Limitation of Voltage

$$V_{m,\min} \leq V_m \leq V_{m,\max} \quad (6)$$

Where,

- GC : total cost of generation
- a_i, b_i, c_i : coefficient generation costs
- C_i : the cost of generating unit i
- G_{mn}, B_{mn} : admittance channel m-n
- V_m : bus voltage magnitude m
- θ_m : bus voltage phase angle m
- θ_n : bus voltage phase angle n
- P_{Gi} : generation magnitude of active power bus i
- Q_{Gi} : generation magnitude of reactive power bus i
- P_{Di} : active power load bus i
- Q_{Di} : reactive power load bus i

2.4. Carbon Emission Function

Exhaust gases from burning fossil fuels containing carbon dioxide discharged into the air and water vapor, as well as other substances such as bleak nitrogen, nitrogen oxides, sulfur oxides and mercury.

The total amount of pollutant emissions from fossil thermal generating units depends on the amount of power generated by each unit. For simplification, the total emissions produced can be modeled as a function of quadratic and exponential term of active power output of the generator unit.

Emissions of pollutants can be described as an optimization of the amount of emissions of pollutants which is defined by the following equation.

Function of minimum carbon emissions is given in the equation 7 and 8 as follows:

$$E_r = \sum_{i=1}^{NG} F_i(P_i) \quad (7)$$

$$E_r(P_i) = \sum_{i=1}^{NG} a_i P_i^2 + \beta_i P_i + \gamma_i + \varepsilon_{i\epsilon^t} \quad (8)$$

The description of parameter in equation 5 and 6 as follows:

E : value of total emission carbon

$E_r(P_i)$: value of carbon emission from generator to - i which is a function of the output power generation.

NG : the value of the number of generation units

a_i, β_i, γ_i : the value of generating carbon emission coefficient to - i

2.5. Smart Installation System

Smart Installation System is a new method to control electrical installation system. This system gives many advantages due to can control electrical system with long distance.

Smart Installation System design consist of:

- a. Relay Driver
- b. Power Supply
- c. Microcontroller
- d. Desktop Program
- e. GSM Application Program

3. Methodology

Methodology from this research consist of multi objective OPF using FPA and multi objective OPF using PSO. Both of this simulation injected using system injection smart installation.

3.1. Flower Pollination Algorithm (FPA) for OPF Simulation

This research used FPA as main method to calculate multi-objective OPF simulation. FPA inspired from the flower pollination process was discovered by Yang in 2012. The FPA provided in step by step as follows :

1. Initialize the initial position and pollen pollinator.
2. The calculation of the fitness value of early, early pollen, local best and global best start.
3. Update position and velocity pollinator
4. Total interest inputted as input loadflow to get the fitness value
5. Update local best global best dan pollinator value
6. Update position and velocity of each pollinator

In simulations, performed by using the movement of natural pollinator. Defined rules on how the position x_i and speed v_i of the d - dimensional renewed search. New solutions x_i^t and v_i^t at time t is given by the following equation:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \epsilon (x_j^t - x_k^t) \quad (9)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + L(g_* - x_i^t) \quad (10)$$

Where $\epsilon \in [0.1]$ is a random collection of distribution, and g_* is a global best location is a solution as compared to the location after the solution of all n pollinator.

To search, one location selected based on the best solution. New solutions for each pollinator raised from movement using the random walk.

$$x_{new} = x_{old} + \epsilon A^t \quad (11)$$

Where $\epsilon \in [-1.1]$ is a random number. Updates the position of pollinator x_i that naturally regulated than the average particle movement. FPA can be assumed to be a combination of standard and intensive local search which is governed by the movement of local and global pollinator.

3.2. Particle Swarm Optimization (PSO) for OPF simulation

This research used Particle Swarm Optimization as secondary method to solve the problems multiobjective OPF. Steps for using this method are explained below:

1) Determine The Fitness Value with Initialization:

Initial the first fitness value obtained by initialization particles that has been entered on loadflow with Newton Raphson method. Then the fitness value will be sorted to get the best fitness value. In determining the best fitness value is then used to determine the value of the initial Localbest and Globalbest early. The aim of this initial initialization for comparison on the next iteration and is used as one of the variables to modify the position and velocity in the equation used.

2) Update Velocity and Particle Position

The equation will be used to update the velocity:

$$V_i^{(k+1)} = w * V_i^k + C_1 * rand_i * (pbest_i - S_i^k) + C_2 * rand_2 * (pbest_i - S_i^k) \quad (12)$$

The equation will be used to update the position:

$$S_i^{(k+1)} = S_i^{(k)} + V_i^{(k+1)} \quad (13)$$

3) Update Pbest and Gbest

At each iteration, Pbest of each particle is modified using the following equation:

$$TC_i^{(k+1)} < TC_i^{(k)} \rightarrow Pbest_{ij}^{(k+1)} = X_{ij}^{(k+1)} \quad (14)$$

$$TC_i^{(k+1)} \geq TC_i^{(k)} \rightarrow Pbest_y^{(k+1)} = Pbest_i^{(k)} \quad (15)$$

Description of the parameters in equation (14) and equation (15) as follows:

$X_{ij}^{(k+1)}$: The position of particle-i at iteration $k + 1$

$TC_i^{(k+1)}$: Objective function evaluated at the particle position-i

$Pbest_{ij}^{(k+1)}$: The best position of individual i to iteration $k + 1$

3.3. Smart Installation System

Scheme of Smart Installation system representation in fig 1.

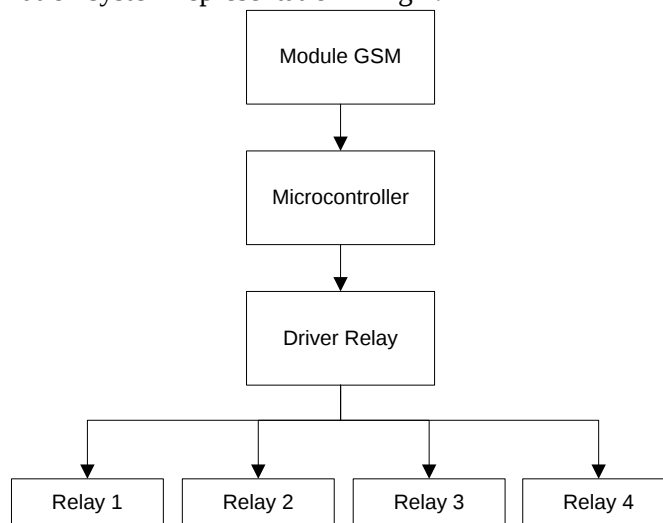


Figure 1. Diagram of Smart Installation

Module GSM is used to receive input from user. From module GSM, data signal transmit to microcontroller for signal processing. Output of signal processing in microcontroller transmit to driver relay as driver for each relay which will control relay on or off.

4. Simulation and Analysis

This research was conducted a simulation to solve the various issues among which the electric energy minimization of combustion emissions from power plants and transmission losses from the plant to the load center. The main method used in this research, is known as Flower Pollination Algorithm (FPA). Another method used in this research as the comparison method to solve the losses in transmission system and emission is PSO.

Table 1. FPA Parameter

Parameter	Value
Number of Flowers	20
Number of Iterations	50
Probability Switch	0.8
L'evy flights	3/2

Table 2. PSO Parameter

Parameter	Value
Number of iterations	50
Number of Swarm	20
C1(Minimum)	1.8
C2(Maximum)	2.0

The parameters that in Table 1 and 2 are utilized consistently in all of simulation for optimal power flow (OPF). The number of particles represent as a number of storage solutions for the OPF. The number of iterations is a total evaluation of the overall functionality.

1. OPF Simulation Using a Single Objective Function

In the first simulation, single function of the emission is used as the objective function. Convergence graph of FPA and PSO is shown in figure 2.

Table 3. Active Power, Losses And Emission Generation Simulation Results Using PSO Method

No	Generator	Total Power(MW)	Losses (MW)	Emission (kg/Hour)
1	Power Generation 1	85.436	5.646	106.411
2	Power Generation 2	56.909		81.396
3	Power Generation 3	44.346		74.169
4	Power Generation 4	34.794		59.955
5	Power Generation 5	30.525		50.500
6	Power Generation 6	37.035		62.267
	Total	289.045	5.646	434,698

Table 4. Active Power, Losses And Emission Generation Simulation Results Using FPA Method

No	Generator	Total Power(MW)	Losses (MW)	Emission (kg/Hour)
1	Power Generation 1	92.375	5.287	121.263
2	Power Generation 2	57.613		82.936
3	Power Generation 3	38.293		61.268
4	Power Generation 4	33.382		57.161
5	Power Generation 5	28.340		46.859
6	Power Generation 6	38.684		65.641
	Total	288.687	5.287	435.128

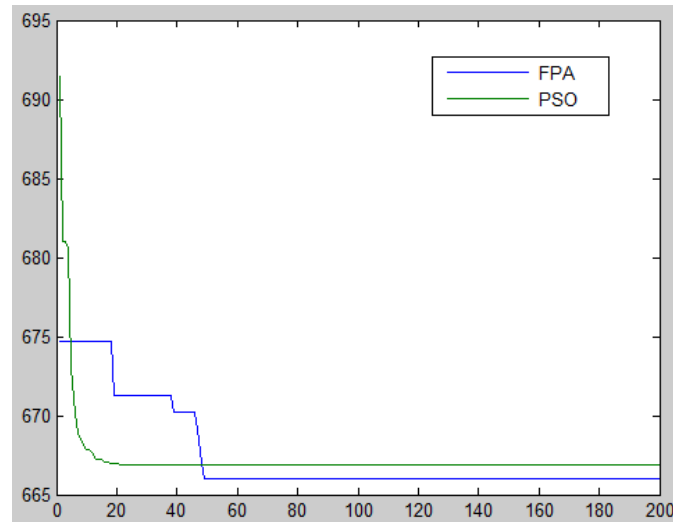


Figure 2. Comparison of Value Convergence FPA and PSO at OPF Simulation for Emission Function

The result from the simulation OPF on IEEE 30 bus test system, method FPA generate value of emission calculation for single objective function more economic, about 435.128 Kg / Hour. The comparison of convergence from FPA and PSO method is shown in Figure 2, PSO reached the point of convergence in iterations 30 with the fitness value 666.7916. And FPA can reach the point of convergence in iterations 25 with the fitness value 667.4109.

2. OPF Simulation Using Multi Objective Function

In the second simulation, multi objective function is used as objective function of the emission and losses. In figure 2 is shown a graph of convergence FPA and PSO.

Table 5 Active Power, Losses and Emission Generation Simulation Results Using PSO Method

No	Generator	Total Power(MW)	Losses (MW)	Emission (kg/Hour)
1	Power Generation 1	91.352	5.184	118.997
2	Power Generation 2	69.264		111.338
3	Power Generation 3	41.165		67.142
4	Power Generation 4	31.076		52.847
5	Power Generation 5	25.239		42.164
6	Power Generation 6	30.487		50.321
	Total	288.583	5.184	442.809

Table 6. Active Power, Losses and Emission Generation Simulation Results Using FPA Method

No	Generator	Total Power(MW)	Losses (MW)	Emission (kg/Hour)
1	Power Generation 1	78.651	4.039	93.061
2	Power Generation 2	63.951		97.711
3	Power Generation 3	50.000		88.005
4	Power Generation 4	35.000		60.373
5	Power Generation 5	26.925		44.647
6	Power Generation 6	32.907		54.464
	Total	287.434	4.039	438.261

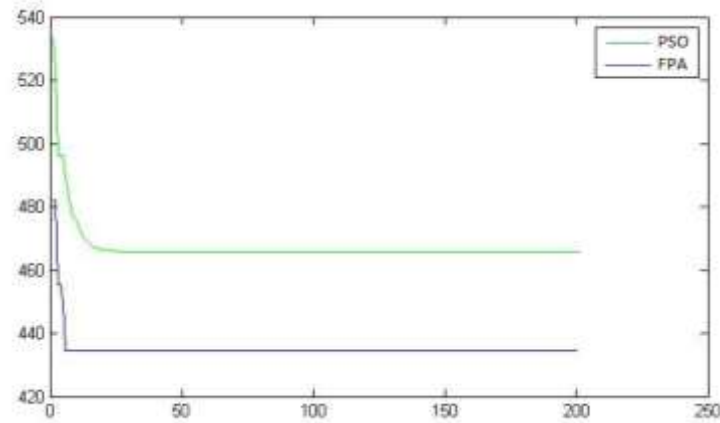


Figure 3. Comparison of Value Convergence WA and PSO at OPF Simulation for Multi Objective Function

The result from the simulation OPF on IEEE 30 bus test system, method FPA generate value of emission and losses calculation for multi objective function about 438.262 Kg / Hour and 4.039 MW. The comparison of FPA and PSO method regarding convergence is shown in Figure 3, PSO reached the point of convergence in iterations 30 with the fitness value 465.7739. And FPA can reach the point of convergence in iterations 50 with the fitness value 434.2240.

5. Conclusion

Based on simulation results obtained can be concluded that:

1. In the simulation with the objective function, the value of total emissions FPA better than the results obtained by the method of PSO. The total value of the emission obtained at 438.261 while the value of total PSO emissions amounting to 442.809.
2. In the simulation of the objective function value of convergence FPA provides total value smaller losses compared with the results obtained by the method of PSO. The total value of losses FPA obtained at 4.039 while the total value of the PSO losses amounted to 5.184.
3. In the simulation by using two objective functions, FPA convergence value indicates better fitness value than the method of PSO. In this simulation fitness values obtained FPA reached 434.2240 while the PSO fitness values obtained at 465.7739.
4. The FPA is a better method than the PSO in solving the problems of losses and emission dispatch.

References

- Wood, A. J. and Wollenberg, B. F. (1984) '*Power Generation, Operation and Control*', USA: John Wiley & Sons.
- Saadat, H. (2004) '*Power System Analysis, second edition*'. USA: McGraw Hill.
- Zhu, J. (2009) '*Optimization of Power System Operation*'.
- Kennedy, J. and Eberhart, R. C. (1995) 'Particle swarm optimization' In *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*. IEEE Service Center: Piscataway.
- Cain, M. B., O'Neill, R. P. and Castillo, A. (2012) '*History of Optimal Power Flow and Formulations*'.
- Yang, X. S. (2010) '*Engineering Optimization, An Introduction with Metaheuristic Applications*'. USA: John Wiley & Sons.
- J. Hazra, A. K. Sinha, A Multi-Objective Optimal Power Flow Using Particle Swarm Optimization, 2010.
- M. A Abido, "Optimal Power Flow Using Particle Swarm Optimization" International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol.24, No. 7 October 2002, pp. 563-571.
- P. Venkatesh, K. Y. Lee, Multi-Objective Evolutionary Programming for Economic Emission Dispatch problem, Power and Energy Society General-Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008, pp. 1-8.
- Xin-She Yang, Flower Pollination Algorithm for Multi-objective Optimization, 2012.

- Xin-She Yang, A New Metaheuristic Flower Pollination Algorithm, 2013.
- P. W. Tsai, et.al, ‘Flower Pollination Inspired Algorithm for Solving Numerical Optimization Problems’, Applied Mechanics and Materials. 2012, 148-149: 134-137.
- Mahor A., Prasad V., Rangnekar S., Emission Dispatch Using Particle Swarm Optimization: a Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009,13, p.2134-2141.
- Jong-Bac Park, A Particle Swarm Optimization for Emission Dispatch with Nonsmooth Cost Functions, 2005.