

PERANCANGAN MOTOR SINKRON TIGA FASA FLUKS AKSIAL ROTOR BELITAN GANDA STATOR DUA SISI

Abdul Multi¹, Iwa Garniwa²

¹Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok 16424

Phone/Fax : 08129529456 / 02177827056

E-mail : multiabd@yahoo.com

²Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok 16424

E-mail : iwa@eng.ui.ac.id

Abstrak

Tulisan ini berisi tentang perancangan motor sinkron tiga fasa fluks aksial rotor belitan (AFWR). Mesin fluks aksial mempunyai kelebihan-kelebihan dibandingkan dengan mesin fluks radial. Mesin ini mempunyai celah udara datar dan dapat diatur. Motor yang dirancang merupakan motor yang berkapasitas skala kecil yang mempunyai 1 kW, 380 V dan 750 rpm. Belitan dipasang pada alur stator dan rotor yang terbuat dari laminasi inti besi. Alur-alur terletak disekeliling permukaan stator dan rotor.

Motor ini mempunyai satu stator-dua sisi alur yang terletak diantara dua rotor. Pada umumnya motor fluks aksial menggunakan magnet permanen yang terpasang pada rotor. Penggantian magnet permanen dengan belitan pada rotor akan menjadikan fluksnya dapat diatur dengan mengatur arus medan yang mengalir pada belitan rotor. Motor jenis ini dapat digunakan untuk menjalankan kendaraan dan proses produksi pada industri kecil.

Hasil dari perhitungan menunjukkan bahwa besaran-besaran listrik telah sesuai dengan unjuk kerja mesin. Meskipun motor sinkron fluks aksial mempunyai komponen rugi-rugi yang lebih banyak, tetapi mempunyai efisiensi dan torsi lebih besar dan dimensi yang lebih kecil dibandingkan dengan motor lain dengan kapasitas yang sama. Motor ini memerlukan sikat yang terletak diatas slipring untuk menyalurkan arus dc dari sumber luar. Dari perhitungan diperoleh efisiensi dan torsi masing-masing 85% dan 14,22 Nm.

Kata kunci: motor sinkron, fluks aksial , efisiensi dan torsi.

1. Pendahuluan

Mesin sinkron selama ini lebih banyak digunakan sebagai generator untuk membangkitkan daya listrik yang besar pada pusat-pusat listrik. Agar generator membangkitkan daya listrik selain rotornya diputar oleh penggerak mula, belitan rotor juga perlu diberikan arus medan. Tegangan yang dihasilkan oleh generator sinkron dapat diatur dengan mengatur arus medan yang mengalir pada belitan rotor. Arus medan diperoleh dari sumber listrik arus searah atau sumber listrik arus bolak balik yang disearahkan. Sumber listrik arus searah tersebut dapat ditempatkan di luar atau di dalam generator yang terpasang pada poros generator.

Mesin sinkron selain digunakan sebagai generator dapat juga digunakan sebagai motor untuk menggerakkan beban mekanik. Motor sinkron mendapat suplai arus bolak balik tiga fasa pada belitan statornya, sedangkan arus

searah dialirkan pada belitan rotornya. Medan magnet pada rotor akan berputar mengikuti medan magnet putar pada stator. Dengan demikian kecepatan putar rotor dan medan magnet pada stator sama (sinkron).

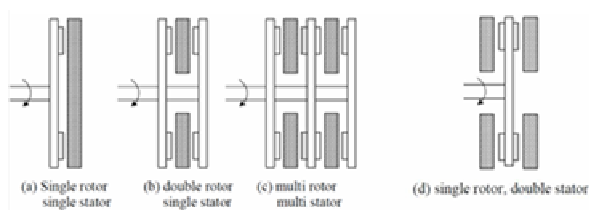
Arus medan yang mengalir melalui belitan rotor dapat diatur untuk mengatur faktor daya. Faktor daya motor sinkron dapat dinaikkan dan diubah dari lagging menjadi leading. Dengan demikian kerja motor sinkron dapat diubah dari mengkonsumsi menjadi menyuplai daya reaktif. Motor sinkron mempunyai kemampuan untuk beroperasi pada faktor daya leading untuk perbaikan faktor daya.

Mesin sinkron yang telah banyak digunakan tersebut diatas adalah jenis mesin fluks radial yang secara topologi stator dan rotornya berbentuk silinder (drum). Arah fluksnya radial yaitu fluks keluar dari kutub utara dan masuk ke kutub selatan tegak lurus dengan poros mesin. Pada mesin jenis ini posisi stator dan rotor tidak

dapat dipertukarkan dan jumlah stator dan rotor tidak dapat diperbanyak, hanya satu rotor yang ditempatkan didalam satu stator.

Mesin fluks aksial (AF) mempunyai keuntungan-keuntungan dibandingkan dengan mesin fluks radial (RF). Diameter rotor yang besar dengan momen inersia yang besar dapat digunakan sebagai flywheel. Mesin AF dapat juga beroperasi sebagai generator dari kecil sampai daya medium. Karena mesin ini mempunyai jumlah kutub yang banyak, maka dapat digunakan untuk peralatan kecepatan rendah, seperti penggerak traksi elektromekanik, hoist atau generator angin. Profil rotor dan stator jenis piringan pada mesin AF memungkinkan untuk perancangan yang menukarkan posisi keduanya. Mesin AF dapat dirancang sebagai mesin dengan celah udara tunggal atau celah udara banyak [1].

Gambar 1 menunjukkan beberapa topologi dasar yang dapat digunakan untuk motor yang pada dasarnya terdiri dari satu piringan rotor atau lebih dan satu piringan stator atau lebih yang satu sama lain ditempatkan secara aksial. Magnet-magnet permanen diletakkan disekeliling piringan rotor sedangkan belitan armatur diletakkan disekeliling piringan stator [2].



Gambar 1. Topologi generator fluks aksial magnet permanen (PM)

Pada penelitian ini akan dirancang dan dibuat motor sinkron tiga fasa fluks aksial dengan rotor belitan (AFWR). Penggunaan belitan pada rotor sebagai pengganti dari magnet permanen agar arus listrik yang mengalir pada belitan medan tersebut dapat diatur, sehingga faktor daya mesin ini dapat diatur. Sedangkan pada statornya tetap ditempatkan belitan yang serupa dengan mesin magnet permanen aksial fluks (AFPM). Pada penelitian ini masalahnya dibatasi pada:

1. Jenis motor yang akan dirancang bangun adalah motor sinkron tiga fasa fluks aksial rotor belitan (AFWR) yang belitan medannya mendapat suplai arus searah dari luar.

2. Motor sinkron tiga fasa AFWR mempunyai satu stator yang terletak diantara dua rotor.
3. Motor sinkron yang akan diteliti adalah mesin listrik yang termasuk kategori skala kecil.

Dengan mengatur arus medan yang mengalir melalui belitan rotor motor sinkron fluks aksial, maka faktor daya dapat diatur dari lagging menjadi leading. Pada faktor daya lagging, daya reaktif dikonsumsi oleh motor sedangkan pada faktor daya leading daya reaktif diberikan oleh motor. Sehingga ketika daya reaktif disuplai, maka motor dapat digunakan untuk perbaikan faktor daya sistem kelistrikan. Selain itu motor sinkron skala kecil tersebut digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban industri skala kecil sampai menengah juga untuk perbaikan faktor daya. Akhirnya, perbaikan faktor daya akan menurunkan konsumsi daya listrik.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Mesin magnet permanen fluks aksial AFPM (*Axial Flux Permanent Magnet*) disebut juga mesin jenis piringan (*disc*). Karena bentuknya yang silindris sehingga berbeda dengan mesin magnet permanen fluks radial (RFPM) terutama dari konstruksinya yang kompak dan kerapatan dayanya yang tinggi. Mesin AFPM cocok untuk kendaraan listrik, pompa, kipas angin dan peralatan industri.

Profil jenis piringan pada rotor dan stator mesin AFPM yang khas memungkinkan disain penempatan stator dan rotor yang saling dipertukarkan. Rotor dapat ditempatkan didalam stator atau sebaliknya. Jumlah stator dan rotor juga dapat diperbanyak. Mesin AFPM dapat didisain sebagai mesin celah udara tunggal atau banyak dengan alur, tanpa alur atau bahkan armatur yang sama sekali tanpa inti besi. Mesin AFPM yang berdaya rendah biasanya didisain sebagai mesin dengan belitan tanpa alur dengan magnet permanen pada permukaannya [1].

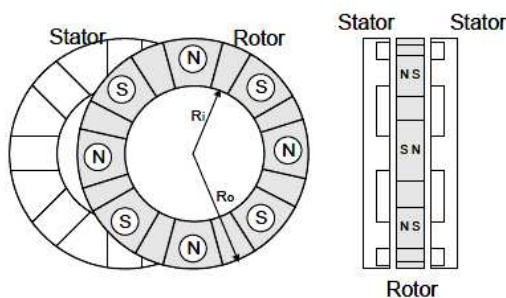
Dewasa ini mesin AFPM digunakan untuk berbagai aplikasi antara lain Generator kecepatan tinggi yang digerakkan oleh turbin gas dalam sistem traksi hybrid, kendaraan listrik hybrid dengan kombinasi mesin listrik flywheel, penggerak roda langsung untuk kendaraan listrik, generator kecepatan rendah yang digerakkan oleh tenaga angin, pada peralatan komputer, perlengkapan kantor dan peralatan storage.

Beberapa peneliti telah menulis hasil penelitiannya mengenai mesin AFPM diantaranya Y. P. Yang, N. A. El – Sonbaty, S. Asghar Gholamian dan D.A. Howey. Mereka meneliti mesin AFPM yang digunakan sebagai penggerak antara lain pada kendaraan listrik atau sebagai pembangkit misalnya pada pembangkit tenaga air dan tenaga angin.

2.2 Mesin AFPM Sebagai Motor

Disain optimal-objektif beragam dari motor roda dc tanpa sikat telah diteliti oleh Y. P. Yang. Motor magnet permanen fluks aksial ini dirancang untuk memperoleh rasio torsi yang besar terhadap berat dan efisiensi motor dan cocok untuk aplikasi penggerak roda langsung. Motor yang dipakai dimodelkan dalam rangkaian magnetik, dan didisain untuk memenuhi spesifikasi optimisasi bagan, memenuhi kendala seperti keterbatasan ruang, kerapatan arus, kejenuhan fluks dan tegangan yang dipakai.

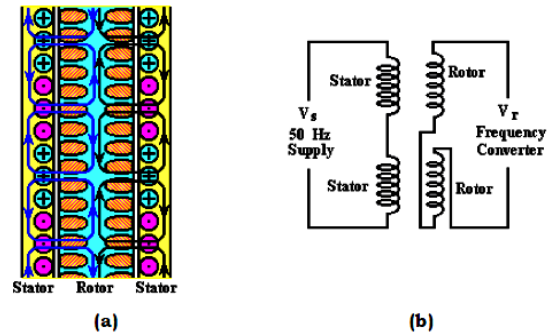
Analisis finite element digunakan untuk memperoleh elektromagnetik, karakteristik thermal dan moda dari motor untuk modifikasi dan verifikasi disain awal. Prototipenya dibuat dan dikontrol oleh penggerak modulasi lebar pulsa dengan bentuk gelombang arus yang optimal. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa sistem daya penggerak langsung yang terpasang pada sepeda motor listrik mempunyai efisiensi yang baik dan jarak jelajah yang jauh. Topologi motor fluks aksial ganda dan konfigurasi 2D diperlihatkan pada Gambar 2 [2].



Gambar 2. Topologi motor fluks aksial ganda

Motor sinkron tiga fasa 4 kutub start sendiri eksitasi ac fluks aksial dengan stator ganda – rotor tunggal telah diteliti oleh N. A. El – Sonbaty. Mesin fluks aksial ini digunakan sebagai penggerak pada kendaraan listrik dan mempunyai keuntungan-keuntungan antara lain mesin menghasilkan profil torsi-kecepatan yang optimum yang diperlukan untuk kendaraan

listrik (EV), efisiensi dan faktor daya tinggi dan harganya murah.

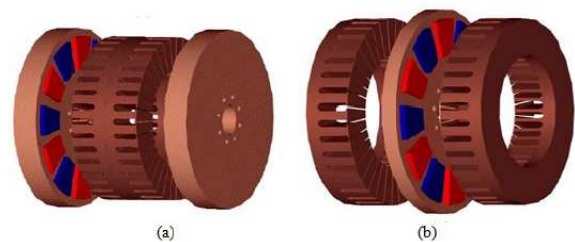


Gambar 3. Motor sinkron fluks aksial stator ganda – rotor tunggal (a) bagian aksial motor (b) hubungan belitan fasa stators dan rotor

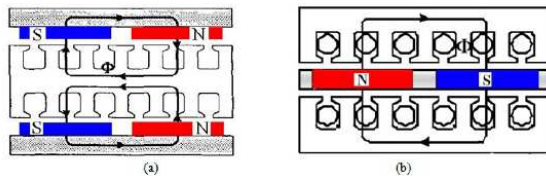
Hasil simulasi dan eksperimen memverifikasi keefektifan cara baru pada motor sinkron fluks aksial eksitasi ac unjuk kerja yang tinggi untuk penggerak kendaraan listrik. Motor sinkron fluks aksial stator ganda – rotor tunggal ditunjukkan pada Gambar 3 [3].

S. Asghar Gholamian telah membandingkan kerapatan torsi diantara dua topologi motor-motor AFPM sisi ganda. Pemilihan motor AFPM dengan kerapatan torsi yang tinggi merupakan parameter penting dalam aplikasi. Dalam tulisannya, persamaan-persamaan ukuran geometri (*sizing*) motor fluks aksial PM jenis satu stator-dua rotor (TORUS) dan dua stator-satu rotor (AFIR) telah dipresentasikan. Perbandingan topologi TORUS dan AFIR dalam hal kerapatan torsinya juga telah digambarkan

Analisis medan kedua topologi motor beralur dikaji dengan menggunakan software metode Finite Element. Motor AF yang dikaji adalah AFPM beralur sisi ganda torsi tinggi. Fluks aksial beralur dan satu pasang kutub pada mesin TORUS-S dan AFIR-S ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5 [4].



Gambar 4. Fluks aksial beralur (a) jenis TORUS-S satu stator-dua rotor (b) jenis dua stator-satu rotor AFIR-S

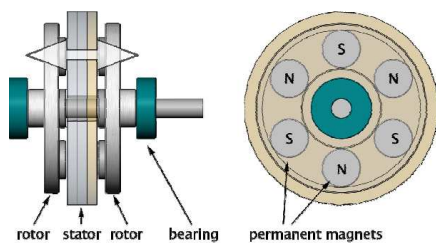


Gambar 5. Satu pasang kutub (a) TORUS-S (b) AFIR-S

2.3 Mesin AFPM Sebagai Generator

Telah dilakukan penelitian oleh D.A. Howey mengenai aplikasi mesin magnet permanen fluks aksial (AFPM) pada pembangkit pico hidro. Pembangkit pico hidro merupakan pembangkit listrik yang telah banyak dipakai dan murah untuk negara berkembang, tetapi masih perlu dikembangkan dan ditekan biayanya.

Mesin AFPM telah diterapkan pada kendaraan listrik sampai turbin angin tetapi masih sedikit diterapkan pada pembangkit hidro. Pada penelitian tersebut ditunjukkan bahwa mesin AFPM dengan ukuran dan harga yang sama dengan generator fluks radial yang digunakan pada pico hidro dapat memproduksi daya output hampir dua kali dengan efisiensi 90%. Tujuan penelitian tersebut adalah melakukan rancang bangun dan pengujian di laboratorium. Generator AFPM ditunjukkan pada Gambar 6. Magnet-magnet permanen disusun untuk memberikan magnetisasi N-S yang bolak balik, panah warna putih menunjukkan medan magnet yang berarah aksial.



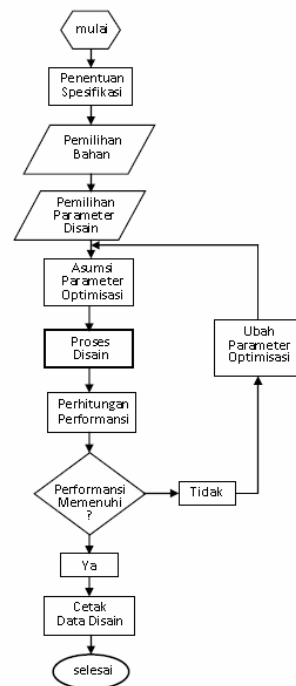
Gambar 6. Pandangan samping dan ujung mesin AFPM 6 kutub.

Mesin AFPM cocok untuk pembangkit mikro hidro karena mudah pembuatannya, murah dan dapat dibuat tanpa inti besi pada statornya (yang dapat menghemat biaya). Bila perancangannya tepat, maka mesin ini sangat efisien [5].

3. METODOLOGI

Perancangan motor sinkron fluks aksial ini dilakukan dengan perhitungan yang didasarkan pada persamaan-persamaan mesin fluks aksial dan mesin fluks radial. Persamaan-persamaan yang digunakan terkait dengan rangkaian listrik, rangkaian magnetik dan mekanik pada bagian stator dan rotor. Untuk ketepatan dan ketelitian dalam perhitungan digunakan program Matlab dan dalam penggambarannya digunakan perangkat lunak Solidworks.

Perancangan motor sinkron ini dimulai dengan menentukan spesifikasi dari mesin. Untuk selanjutnya dilakukan pemilihan bahan dan pemilihan parameter disain. Sebelum proses perancangan terhadap rangkaian listrik, rangkaian magnetik dan mekanik dilakukan, terlebih dahulu diasumsikan parameter optimisasi terkait dengan spesifikasi mesin.



Gambar 7. Diagram alir perancangan

Pada akhir dari proses perancangan ini diharapkan performansi mesin terpenuhi. Bila performansinya belum terpenuhi, maka proses perancangan perlu diulangi dengan mengubah parameter optimisasi. Bila performansi telah terpenuhi, maka lembar data perancangan dapat dicetak. Tahapan-tahapan dalam perancangan ditunjukkan dengan diagram alir pada Gambar 7. Proses optimisasi dalam perancangan mesin

bertujuan agar diperoleh efisiensi yang lebih tinggi dengan berpatokan pada daya output yang telah ditentukan sebelumnya.

Mesin yang dirancang adalah motor sinkron tiga fasa fluks aksial rotor belitan (AFWR) dimana arah fluksnya sejajar dengan poros. Stator dan rotornya berbentuk piringan dan terletak sejajar bersebelahan. Stator dengan dua sisi alur diletakkan diantara rotor kembar (*twin*). Baik stator maupun rotor mempunyai inti besi yang beralur dan dililit.

Pada prinsipnya, perancangan mesin fluks aksial (AF) secara elektromagnetik sama dengan perancangan mesin fluks radial (RF). Mesin fluks aksial identik dan mirip (*counterparts*) dengan mesin fluks radial, namun perancangan mekanik dan proses perakitannya lebih kompleks [1].

Spesifikasi motor sinkron tiga fasa AFWR yang akan dirancang merupakan besaran nominal (rated). Besaran-besaran tersebut meliputi: daya output, tegangan terminal (fasa ke fasa), frekuensi, putaran rotor dan faktor daya. Dengan berpatokan pada spesifikasi motor tersebut dan menggunakan persamaan-persamaan yang ada dihitung parameter optimisasi yang meliputi celah udara, tegangan eksitasi, jumlah lilitan dan diameter konduktor belitan stator.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Nilai parameter-parameter mesin yang diperoleh dari hasil perhitungan dengan menggunakan MATLAB digunakan untuk menganalisis kinerja mesin yang berpatokan pada daya output. Rugi besi diasumsikan 5% dan rugi gesekan dan angin 7% dari daya output [1, 12]. Pokok masalahnya diarahkan pada daya output dan efisiensi. Daya output telah ditetapkan tertentu besarnya, sedangkan efisiensi dicari nilai yang tertinggi. Dengan mengubah-ubah suatu parameter, maka daya output dan efisiensi akan berubah.

Efisiensi dicari pada nilai yang optimal tetapi dengan daya output yang tetap. Efisiensi yang maksimal dapat diperoleh dengan mengubah parameter optimisasi yang terdiri dari celah udara, tegangan eksitasi, diameter konduktor dan jumlah lilitan stator. Spesifikasi kerja mesin yang diperlukan ditunjukkan pada Tabel 1.

Hasil perhitungan menunjukkan kinerja mesin pada daya output 1 kW dan efisiensi 85%

ditunjukkan pada Tabel 2. Dengan mengubah-ubah parameter optimisasi, maka parameter-parameter mesin lainnya juga berubah. Pada perhitungan efisiensi, parameter optimisasi direntangkan sedangkan efisiensi dan daya output diperiksa dan dipilih. Dari hasil perhitungan diperoleh pula dimensi alur-alur stator dan rotor. Alur-alur stator dan rotor yang belum dililit diperlihatkan pada Gambar 8.

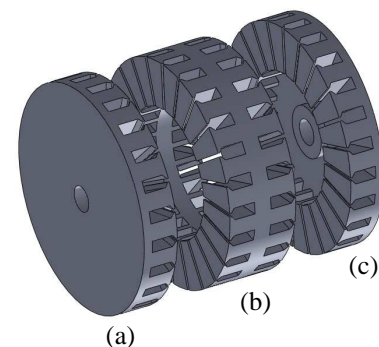
Dari hasil perhitungan diperoleh bahwa pada celah udara 5 mm, tegangan eksitasi 10 V, diameter konduktor stator 0,5 mm dan jumlah lilitan stator per fasa 440 lilitan memberikan solusi terbaik.

Tabel 1. Spesifikasi kerja mesin yang diperlukan

Daya output (W)	1.000
Tegangan terminal (V)	380
Jumlah kutub	8
Frekuensi (Hz)	50
Faktor daya	0,83

Table 2. Parameter optimisasi pada efisiensi 85% dan daya output 1kW.

Celah udara (mm)	5
Tegangan eksitasi (V)	10
Jumlah lilitan stator per fasa	440
Diameter of konduktor (mm)	0,5

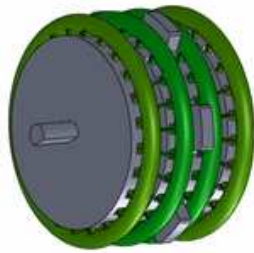


Gambar 8. stator tunggal alur ganda terletak diantara dua rotor yang belum dililit.
(a) Rotor, (b) Stator dan (c) Rotor

Dimensi stator dan rotor termasuk alur-alurnya dipertahankan tetap dalam perhitungan

optimisasi. Sehingga perubahan jumlah lilitan dan diameter konduktor stator harus diperiksa apakah masih memenuhi syarat atau tidak untuk dimensi alur tersebut. Pemeriksaan persyaratan didasarkan pada faktor pengisian alur (*slot fill factor*). Untuk jumlah lilitan stator N_1 440 lilitan, jumlah konduktor per alur 220 dan diameter konduktor d_a 0,5 mm, maka diperoleh faktor pengisian alur k_{fs} sebesar 0,3629. Alur-alur stator dan rotor yang sudah dililit diperlihatkan pada Gambar 9.

Faktor pengisian alur untuk mesin tegangan rendah dengan konduktor persegi diasumsikan 0,6. Sedangkan faktor pengisian alur untuk mesin tegangan rendah dengan konduktor bulat sekitar 0,4 [8]. Pada standar mesin, konduktor tembaga menempati hanya setengah dari ruang belitan alur, sehingga faktor pengisian alur sebesar 0.5 [12].



Gambar 9. Stator dan rotor yang telah dililit

5. KESIMPULAN

Dari analisis perancangan dan pembuatan motor fluks aksial rotor belitan tiga fasa yang terdapat pada pembahasan sebelumnya, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari hasil perhitungan diperoleh lebar celah udara 5 mm, tegangan eksitasi 10 V, jumlah lilitan stator per fasa 440 dan diameter konduktor belitan stator 0,5 mm menunjukkan solusi terbaik pada efisiensi 85%.
2. Mesin sinkron AFWR tiga fasa menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan mesin jenis lainnya pada daya output 1 kW, karena mempunyai rugi-rugi yang lebih kecil.
3. Dengan jumlah konduktor per alur sebanyak 220 dan diameter konduktor stator sebesar 0,548 mm, maka diperoleh faktor pengisian alur sebesar 0.3757 yang masih memenuhi persyaratan untuk mesin tegangan rendah dengan konduktor bulat.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Jacek F. Gieras, Rong-Jie Wang, Maarten J. Kamper, "Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines", Kluwer Academic Publishers, London, 2004.
- [2] Funda Sahin, "Design And Development Of A High-Speed Axial-Flux Permanent-Magnet Machine", Technische Universiteit Eindhoven, 2001.
- [3] Y.P. Yang, C.H. Cheung, S.W. Wu, J .P Wang, "Optimal Design And Control Of Axial-Flux Brushless Dc Wheel Motor For Electrical Vehicles", Proceedings of the 10th Mediterranean Conference on Control and Automation - MED2002, Lisbon, Portugal, July 9-12, 2002.
- [4] A. Parviainen, J. Pyrhönen, M. Niemelä, "Axial Flux Interior Permanent Magnet Synchronous Motor With Sinusoidally Shaped Magnets", International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering Cracow, Poland, September 20-22, 2001 2001.
- [5] N. A. El – Sonbaty, "A Novel AC Excited Axial Flux Synchronous Motor For Electric Vehicles", Alexandria Engineering Journal, Vol. 42 (2003), No. 2, 209-217.
- [6] Sunil Kumar Challa, "Comparative Study Of Axial Flux Permanent Magnet Brushless Dc Motor Operating With The Winding Connected In single-Phase And Two-Phase System", B.Tech, J.N.T.U, August, 2006.
- [7] S. Asghar Gholamian, M.T. Abbasi Ablouie, A. Mohseni and S. Esmaeili Jafarabadi, "Effect of Air Gap on Torque Density for Double-Sided Axial Flux Slotted Permanent Magnet Motors using Analytic and FEM Evaluation", Journal of Applied Sciences Research, 5(9): 1230-1238, Tehran, 2009.
- [8] D.A. Howey, "Axial Flux Permanent Magnet Generators For Pico-Hydropower", Ewb-Uk Research Conference 2009, South Kensington ,February 20th 2009.
- [9] Stephen J. Chapman, "Electric Machinery Fundamentals", Fourth Edition, McGraw-Hill, Inc , Australia, 2004.
- [10] Sahwney A.K, "A Course in Electrical Machine Design", Dhanpat Rai & Co, Delhi, 2005.

- [11] Juha Pyrhönen, Tapani Jokinen, Val'eria Hrabovcov'A, "Design Of Rotating Electrical Machines", John Wiley & Sons, New Delhi, 2008.
- [12] Juha Pyrhönen, Tapani Jokinen, Val'eria Hrabovcov'A, "Design Of Rotating Electrical Machines", John Wiley & Sons, New Delhi, 2008.