

FABRIKASI MOTOR SINKRON TIGA FASA FLUKS AKSIAL ROTOR BELITAN

¹ Abdul Multi, ² Budiyanto, dan ³ Sugianto

^{1,3} Program Studi Teknik Elektro, ISTN, Jl. Moh. Kahfi II, Jagakarsa Jakarta 12640

² Program Studi Teknik Elektro, UMJ, Jl. Cempaka Putih Tengah I No.1 Jakarta Pusat 10510

e-mail: ¹ multiabd@yahoo.com, ² yan.budiyanto@yahoo.com, ³ sugianto_emi@yahoo.com

Abstrak. Fabrikasi dilakukan setelah bagian-bagian dari motor sinkron tiga fasa fluks aksial rotor belitan selesai dirancang. Motor yang difabrikasi merupakan motor yang berkapasitas skala kecil yang mempunyai 1 kW, 380 V dan 750 rpm. Mesin ini mempunyai celah udara datar dan dapat diatur. Kumparan 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 eksitasi yang mengalir pada kumparan medan. Untuk menghasilkan arus beban yang cukup kedua kumparan stator dua sisi dihubungkan paralel, kedua kumparan rotor juga dihubungkan paralel dan celah udara disetel pada jarak 0,5 mm. Hasil pengukuran hambatan kumparan stator per fasa dan rotor diperoleh masing-masing 26,17 ohm dan 0,396 ohm.

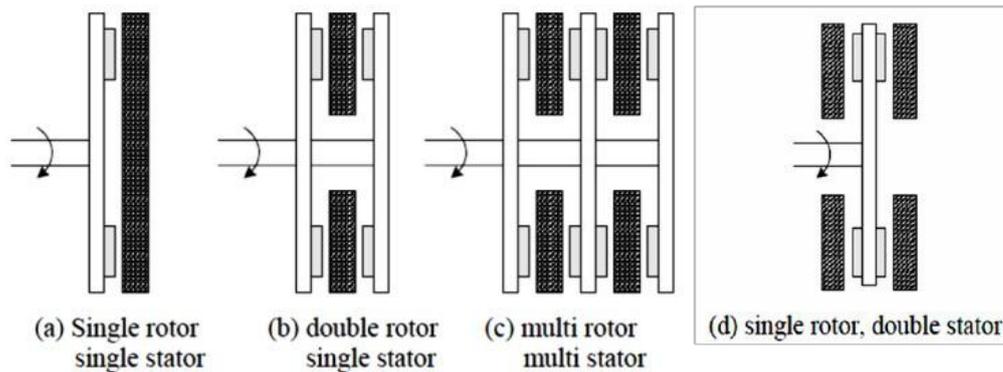
Kata kunci: motor sinkron, fluks aksial, rotor belitan

1. Pendahuluan

Mesin sinkron selama ini lebih banyak digunakan sebagai generator untuk membangkitkan daya listrik yang besar pada pusat-pusat listrik. Agar mesin ini dapat membangkitkan daya listrik selain rotornya diputar oleh penggerak mula, kumparan rotor juga perlu diberikan arus eksitasi. Tegangan yang dihasilkan oleh mesin sinkron dapat diatur dengan mengatur arus eksitasi yang mengalir pada kumparan rotor. Arus eksitasi 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 mesin yang terpasang pada poros mesin.

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 lebar celah udara tidak dapat diubah, 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 mempunyai kelebihan-kelebihan dibandingkan dengan mesin fluks radial. Dengan arah fluksnya yang aksial, maka mesin jenis ini mempunyai ukuran yang lebih kecil. Lebar celah udara dapat diubah, posisi stator dan rotor dapat dipertukarkan dan jumlah stator dan rotor dapat diperbanyak seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Topologi mesin

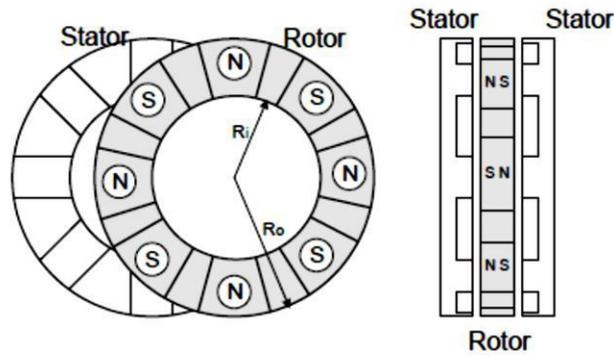
Mesin fluks aksial (AF) adalah mesin yang stator dan rotornya berbentuk piringan (disk) dan biasanya rotor terbuat dari magnet permanen (PM) yang berjumlah banyak. Dengan banyaknya magnet permanen, maka putaran dari mesin dapat lebih lambat. Rotor dapat ditempatkan didalam stator atau sebaliknya.

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 kumparan medan tersebut dapat diatur, sehingga faktor daya pada mesin ini dapat diatur. Sedangkan pada statornya tetap ditempatkan kumparan yang serupa dengan mesin magnet permanen fluks aksial (AFPM). Pada penelitian ini juga akan dilihat pengaruh perubahan celah udara terhadap parameter mesin yang lainnya. Jadi keterbaruan penelitian ini adalah pengaturan arus eksitasi yang mengalir pada kumparan medan motor sinkron fluks aksial rotor belitan (AFWR) untuk menjadikan faktor dayanya dapat diatur.

2. Tinjauan Pustaka

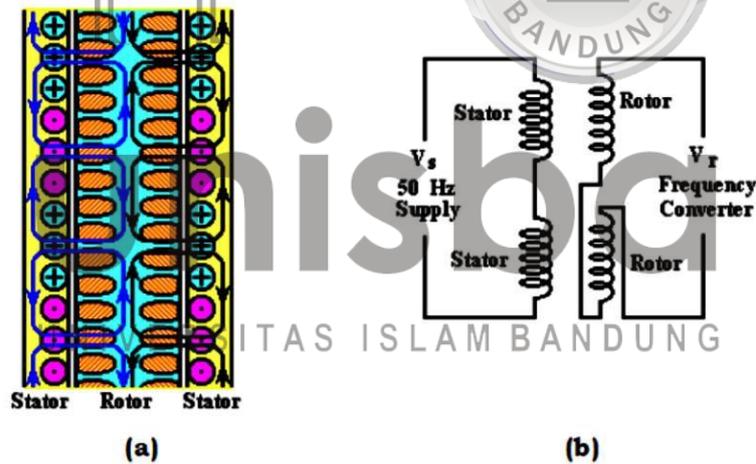
Disain optimal-objektif beragam dari motor roda dc tanpa sikat telah diteliti oleh Y. P. Yang. Motor magnet permanen fluks aksial ini dirancang untuk memperoleh rasio torsi yang besar terhadap berat dan efisiensi motor dan cocok untuk aplikasi penggerak roda langsung. Motor yang dipakai dimodelkan dalam 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.



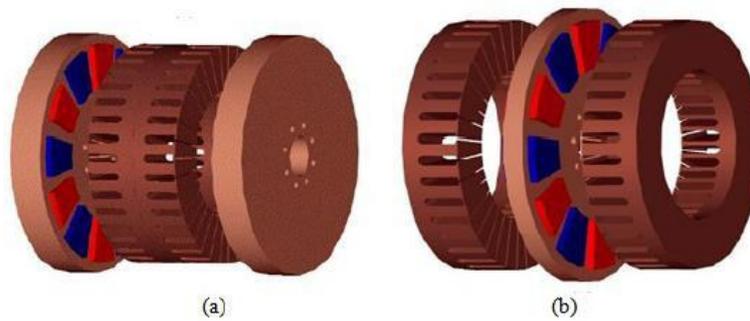
Gambar 2 Topologi motor fluks aksial ganda

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. Motor sinkron fluks aksial stator ganda – rotor tunggal ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Motor sinkron fluks aksial stator ganda – rotor tunggal (a) Bagian aksial motor (b) Hubungan kumparan fasa stator dan rotor

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. Fluks aksial beralur dan satu pasang kutub pada mesin TORUS-S dan AFIR-S ditunjukkan pada Gambar 4.



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

3. Pembuatan Motor AFWR

Setelah dilakukan perhitungan dengan menggunakan perangkat lunak Matlab, kemudian dibuatkan gambar baik tiga dimensi maupun dua dimensi dengan menggunakan perangkat lunak Solidworks. Sedangkan untuk pembuatan (fabrikasi) motor tersebut didasarkan pada gambar dua dimensi Solidworks.

3.1 Pembuatan Stator Mesin AFWR

Motor AFWR ini dirancang untuk menghasilkan kecepatan putaran poros 750 rpm dengan frekuensi 50 Hz dan mempunyai jumlah kutub 8. Tegangan terminal 380 V dan tegangan fasanya sebesar 219,39 V. Daya keluaran motor 1.000 W dan torsi 12,73 Nm, dengan menentukan atau menghitung besaran-besaran yang terkait dengan persamaan untuk mendapatkan diameter luar piringan inti besi stator dan rotor, dengan $\epsilon = 0,9607$, $k_d = 0,5714$, $n_s = 12,5$ putaran/detik, $B_{mg} = 0,6305$ Wb/m², $A_m = 5,712$ A/m², $\cos\phi = 0,83$ dan $k_D = 0,1323$, maka diperoleh diameter luar $D_{out} = 0,28$ m. diameter dalam dapat dihitung dan diperoleh sebesar $D_{in} = 0,16$ m. Dimensi diameter, jari-jari luar dan dalam piringan inti besi stator yang mempunyai 24 alur ditunjukkan pada Gambar 5. Stator tunggal yang mempunyai alur ganda terletak diantara dua rotor. Kedua rotor tersebut dipasangkan pada poros.

3.2 Alur Stator

Piringan stator dan rotor mempunyai alur masing-masing sebanyak 24 alur. Motor ini terdiri dari 2 rotor dengan satu sisi alur dan 1 stator dengan 2 sisi alur. Pada setiap sisi terdapat alur-alur yang berjumlah sama. Laminasi piringan pelat baja silikon yang telah difabrikasi alur-alurnya diperlihatkan pada Gambar 5.

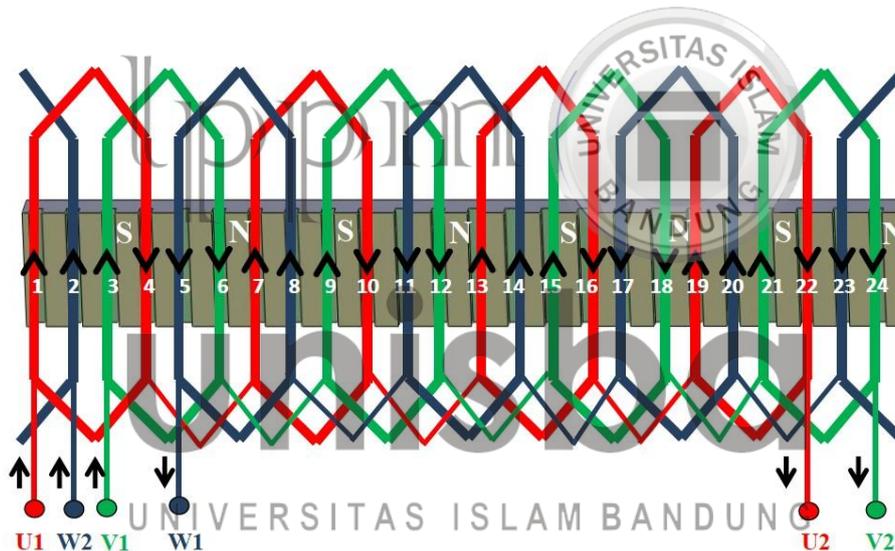


Gambar 5 alur-alur stator dan rotor alur rotor yang telah difabrikasi

3.3 Kumparan Stator

Arus yang mengalir pada setiap kumparan pada satu sisi stator 1.0203 A dimana kumparan stator dihubungkan bintang dan banyaknya fasa $m_1 = 3$, maka jumlah lilitan armatur per fasa diperoleh 440 lilitan/fasa. Stator digulung dengan langkah koil sebanyak 3 alur, berarti untuk konduktor yang keluar dari alur 1 akan masuk ke alur 4, konduktor yang keluar dari alur 7 akan masuk ke alur 10 dan seterusnya. Agar diperoleh stator yang memiliki 8 kutub maka dilakukan penggulangan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Konduktor kawat tembaga yang digulung pada stator mempunyai luas penampang $s_a = 1,96 \times 10^{-7} \text{ m}^2$, maka diameter konduktor 0,5 mm.

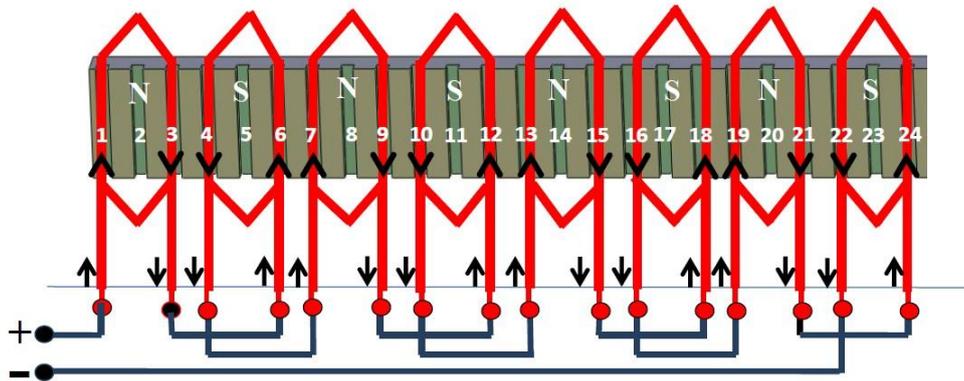
Dengan mengambil isolasi enamel konduktor kelas F (115 °C) yang mempunyai tebal 0,024 mm dan diameter kawat yang telah dihitung diatas, maka diameter kawat dengan isolasi enamel dapat diperoleh sebesar 0,548 mm. Luas total seluruh konduktor didalam alur stator $5.3776 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, diameter dan luas penampang alur lingkaran masing-masing 13,5 mm dan $1.43 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, maka faktor pengisian alur (slot fill factor) diperoleh sebesar 0.3757. Bentangan kumparan pada stator secara mendatar ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6 Bentangan mendatar kumparan stator 8 kutub

3.4 Pembuatan Rotor Mesin AFWR

Mesin ini mempunyai 2 rotor (ganda) yang masing-masing terdiri dari 24 alur. Alur-alur akan diisi dengan konduktor kumparan medan yang dialiri arus searah yang bertegangan 10 V. Rotor digulung dengan langkah koil sebanyak 2 alur, berarti untuk konduktor yang keluar dari alur 1 akan masuk lagi ke alur 3, konduktor yang keluar dari alur 4 akan masuk lagi ke alur 6 dan seterusnya. Agar diperoleh rotor yang memiliki 8 kutub maka dilakukan penggulangan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Konduktor kawat tembaga yang digulung pada rotor tersebut mempunyai luas penampang $2,118 \text{ mm}^2$.



Gambar 7 Bentangan mendatar kumparan rotor 8 kutub

Dengan mengambil isolasi enamel konduktor kelas F yang mempunyai tebal $t_e = 0,024$ mm, diameter kawat dengan isolasi enamel diperoleh $d_{fe} = 1,648$ mm. Jumlah konduktor dalam satu alur rotor diperoleh 63 konduktor/alur.

Untuk menghubungkan sumber arus searah yang diam ke kumparan rotor yang berputar, maka digunakan sikat (*brush*). Sikat terbuat dari bahan karbon grafit yang mempunyai batasan aplikasi untuk kerapatan arus 8 sampai dengan 12 A/cm^2 untuk kerja terus menerus dan maksimum 30 A/cm^2 dengan kecepatan peripheral yang diizinkan sampai dengan 25 m/s.

Dengan arus eksitasi dc yang mengalir melalui sikat sebesar 4,126 A dan motor dilengkapi dengan 2 sikat berukuran $10 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ EG367J ($10 \times 16 \times 25 \text{ mm}^3$). Arus eksitasi mengalir melalui sikat yang pertama dan kembali melalui sikat yang kedua. Permukaan kontak total $1,60 \text{ cm}^2$. Kerapatan arusnya adalah $2,58 \text{ A/cm}^2$.

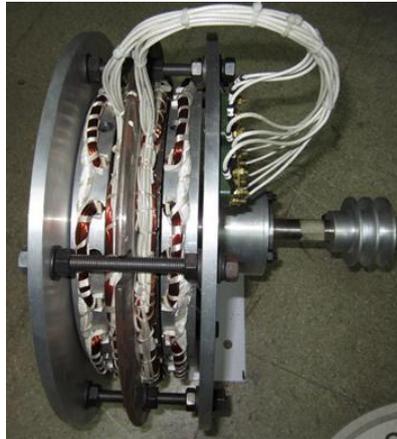
Karena kumparan rotor berputar dan sikat diam, maka diperlukan slip ring sebagai media yang menghubungkan antara kumparan rotor dan sikat. Untuk menghubungkan sumber arus searah dari luar dengan kumparan rotor yang kedua ujungnya diikatkan pada slip ring, maka diperlukan dua sikat dan dua slip ring. Sikat yang diam menempel pada slip ring yang berputar. Slip ring terbuat dari tembaga yang melingkari poros rotor dan dipisahkan oleh isolasi.

Slip ring yang digunakan sebanyak 2 buah untuk dihubungkan dengan polaritas positif dan negatif sumber arus searah. Slip ring terbuat dari bahan tembaga yang mempunyai ukuran $12 \text{ mm} \times 2,5 \text{ mm} = 30 \text{ mm}^2$. Slip ring ini mampu untuk dilalui arus searah melebihi 50 A. Sedangkan arus eksitasi yang melalui sling ring ini hanya 4,24 A yang dihitung dengan tegangan eksitasi 10 V dan hambatan medan $2,36 \Omega$.

4. Perakitan Mesin Afwr

Setelah seluruh bagian-bagian mesin selesai dibuat, kedua sisi stator dan kedua rotornya telah selesai dipasangkan kumparan, maka langkah berikutnya adalah melakukan perakitan. Perakitan dimulai dari pemasangan stator dan rotor, pemasangan slipring dan sikat, pemasangan rotor dan penyambungan kumparan. Motor AFWR yang telah selesai dirakit ditunjukkan pada Gambar 8.

Perubahan celah udara motor AFWR dilakukan dengan memasang ring pada poros untuk membuat celah udara pertama menjadi lebih besar. Sedangkan untuk membuat celah udara yang kedua sama dengan celah udara yang pertama dilakukan dengan mengatur posisi jarak antara rotor dan stator dengan jarak yang tepat. Untuk mengukur jarak dan ketebalan celah udara digunakan jangka sorong dan feeler gauge.



Gambar 8 Motor AFWR yang telah selesai dirakit

Kumparan-kumparan stator pada satu sisi digabungkan dengan kumparan-kumparan stator pada sisi yang lainnya dan kemudian dihubungkan bintang. Kumparan stator sisi yang pertama diberi tanda dengan huruf A dan ujung-ujung kumparan ketiga fasanya diberi tanda dengan angka 1 dan 4 untuk kumparan fasa R, angka 2 dan 5 untuk kumparan fasa S dan angka 3 dan 6 untuk kumparan fasa T.

Ujung-ujung kumparan stator sisi yang pertama ini, untuk ketiga fasanya dapat ditulis masing-masing menjadi A1-A4, A2-A5 dan A3-A6. Begitu pula untuk kumparan stator sisi yang lainnya (kedua) diberi tanda dengan huruf B dan ujung-ujung kumparan ketiga fasanya diberi tanda dengan angka 1 dan 4 untuk kumparan fasa R, angka 2 dan 5 untuk kumparan fasa S dan angka 3 dan 6 untuk kumparan fasa T. Ujung-ujung kumparan stator sisi yang kedua ini, untuk ketiga fasanya dapat ditulis masing-masing menjadi B1-B4, B2-B5 dan B3-B6. Keenam ujung kumparan-kumparan stator tersebut dihubungkan pada terminal motor. Pada terminal tersebut kumparan-kumparan stator dapat dihubungkan bintang atau segitiga.

Kumparan-kumparan rotor yang terdapat pada satu piringan (*disc*) dihubungkan paralel dengan kumparan-kumparan rotor yang terdapat pada piringan yang lainnya. Kedua ujung kumparan rotor tersebut dihubungkan dengan kedua slip ring yang berputar. Kedua sikat yang menempel pada slip ring dihubungkan dengan sumber tegangan dc.

5. Kesimpulan dan Saran

Kumparan stator yang mempunyai 440 lilitan per fasa dan diameter konduktor 0,5 mm menghasilkan hambatan 26,17 ohm, kedua kumparan stator yang masing-masing terhubung bintang dihubungkan paralel untuk menghasilkan arus beban yang cukup. Motor sinkron AFWR ini mempunyai daya 1 kW dan putaran 750 rpm. Celah udaranya disetel pada jarak 0,5 mm. Setelah motor ini selesai difabrikasi maka selanjutnya dilakukan pengujian dan analisis.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Jenderal Perguruan Tinggi yang telah memberikan dukungan dana dengan nomor kontrak 0263/E5/2014.

Daftar pustaka

- A. Mahmoudi, N. A. Rahim, H. W. Ping “Axial-Flux Permanent-Magnet Motor Design For Electric Vehicle Direct Drive Using Sizing Equation And Finite Element Analysis “, *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 122, 467-496, 2012.
- A. Mahmoudi, N. A. Rahim, W. P. Hew, “Axial-flux permanent-magnet machine modeling, design, simulation and analysis”, *Scientific Research and Essays* Vol. 6 (12), pp. 2525-2549, 18 June, 2011.
- Amin Mahmoudi, Solmaz Kahourzade, Nasrudin Abd Rahim, Hew Wooi Ping, Mohammad Nasir Uddin, “Design and prototyping of an optimised axial-flux permanent-magnet synchronous machine”, *IET Electr. Power Appl.*, 2013, Vol. 7, Iss. 5, pp. 338–349.
- Amin Mahmoudi, Solmaz Kahourzade, Nasrudin Abd Rahim, Wooi Ping Hew, “Design, Analysis, and Prototyping of an Axial-Flux Permanent Magnet Motor Based on Genetic Algorithm and Finite-Element Analysis”, *IEEE Transactions On Magnetics*, Vol. 49, No. 4, April 2013.
- Christian Du-Bar, “Design of an axial flux machine for an in-wheel motor application”, *Master of Science Thesis*, Chalmers University Of Technology, Goteborg, 2011
- Garrison F. Price, Todd D. Batzel, Mihai Comanescu, Bruce A. Muller “Design and Testing of a Permanent Magnet Axial Flux Wind Power Generator”, *Proceedings of The 2008 IAJC-IJME International Conference*, Nashville, 2008.
- Hideki Kobayashi, Yuhito Doi, Koji Miyata, Takehisa Minowa, “Design of the axial-flux permanent magnet coreless generator for the multi-megawatts wind turbine”, *Magnetic Materials R&D Center*, Fukui, 2009.
- Jacek F. Gieras, Rong-Jie Wang, Maarten J. Kamper, “Axial Flux Permanen Magnet Brushless Machines”, *Kluwer Academic Publishers*, London, 2004.
- Moury, Sanjida “Design of low speed axial flux permanent magnet generators for marine current application”, *ProQuest Dissertations and Theses*, Ottawa, 2009.
- Rong-Jie Wang, Maarten J. Kamper, Kobus Van der Westhuizen, Jacek F. Gieras, ‘Optimal Design of a Coreless Stator Axial Flux Permanent-Magnet Generator’, *IEEE Transactions On Magnetics*, Vol. 41, No. 1, January 2005.
- Saeid Javadi, Mojtaba Mirsalim, “Design and Analysis of 42-V Coreless Axial-Flux Permanent-Magnet Generators for Automotive Applications”, *IEEE Transactions On Magnetics*, Vol. 46, No. 4, April 2010.