

Rancang Bangun Multistage Generator Magnet Permanen Fluksi Aksial

Febri Angriawan¹, Muldi Yuhendri²

^{1,2}Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang
Jl. Prof Dr. Hamka Air Tawar, Padang, Indonesia
Febriangriawan14@gmail.com¹, muldiy@ft.unp.ac.id

Absrak — Many low speed generators have been developed for electric power generation, as they do not require additional gearboxes, making them more efficient. Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) is one type of generator that has been developed for low speed generators. One type of PMSG developed for low speed generators is the axial flux, that also called Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator (AFPMSG). To increase the generator output voltage, the AFPMSG was developed in a multistage stator and rotor configuration. This research proposes multistage AFPMSG with double stator single rotor configuration. This generator is designed by using twenty four Neodymium N52 type permanent magnets for rotor and using nine coils for a three-phase system on each stator disk. AFPMSG was tested using horizontal axis wind turbines with varying rotor speeds. The experiment results show that the generator can produce a voltage of 7.4 volts in the neutral phase and 12 volts in the phases with a speed rating of 200 Rpm. This simulation results show that the proposed AFPMSG provides excellent performance in line with expectations.

Keyword — AFPMSG, permanent magnet, wind turbine, fluksi aksial, neodymium N52.

Abstrak— Banyak generator berkecepatan rendah telah dikembangkan untuk pembangkit tenaga listrik, di karenakan tidak memerlukan tambahan gearbox, sehingga lebih efisien. Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) merupakan salah satu jenis generator yang banyak dikembangkan untuk generator kecepatan rendah. Salah satu jenis PMSG yang dikembangkan untuk generator kecepatan rendah adalah jenis fluksi aksial, yang disebut juga dengan Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator (AFPMSG). Untuk meningkatkan tegangan keluaran generator, AFPMSG dikembangkan dalam konfigurasi multistage stator dan rotor. Penelitian ini mengusulkan multistage AFPMSG dalam bentuk dua stator satu rotor dengan menggunakan dua puluh empat magnet permanen tipe Neodymium N52 pada rotor dan sembilan kumparan pada setiap piringan statornya untuk sistem tiga fasa. AFPMSG ini diuji menggunakan turbin angin sumbu horizontal dengan kecepatan putaran yang bervariasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa generator dapat menghasilkan tegangan 7,4 volt pada fasa - netral dan 12 volt pada fasa - fasa dengan rating kecepatan 200 Rpm. Hasil ini menunjukkan bahwa AFPMSG yang dirancang dalam penelitian ini telah bekerja sesuai dengan yang diharapkan.

Kata kunci— AFPMSG, magnet permanen, tubin angin, fluksi aksial, Neodymium N52.

I. PENDAHULUAN

Generator adalah mesin listrik yang digunakan untuk menghasilkan daya listrik dengan menggunakan daya mekanik sebagai sumber daya primernya [1]. Generator ini akan mengkonversikan daya mekanik sebagai daya inputnya menjadi daya listrik untuk disalurkan ke konsumen. Oleh sebab itu, generator ini banyak digunakan pada pembangkit-pembangkit yang menggunakan daya mekanik, seperti pembangkit tenaga air, tenaga uap, tenaga angin dan sebagainya.

Banyak jenis generator yang dapat digunakan untuk pembangkit tenaga listrik, salah satunya adalah generator sinkron. Berdasarkan strukturnya, ada dua jenis generator sinkron, yaitu generator sinkron rotor lilit dan generator sinkron magnet permanen [1]. Pembangkit-pembangkit berdaya kecil umumnya banyak menggunakan generator sinkron magnet permanen sebagai penghasil daya listriknya. Ciri khas generator ini menggunakan magnet

permanen sebagai penghasil medan magnetnya, sehingga tidak membutuhkan kumparan medan. Beberapa jenis magnet permanen yang dapat digunakan adalah magnet Neodymium, magnet Alnico, keramik dan samarium [2]. Magnet Neodymium merupakan jenis magnet permanen yang banyak digunakan untuk generator, karena medan magnetnya lebih kuat dan lebih tahan lama dibandingkan magnet lain [3]-[4].

Generator sinkron magnet permanen ini atau disebut juga dengan *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) banyak digunakan karena memiliki keunggulan seperti efisiensi tinggi, densitas daya yang bagus, ukurannya lebih kecil dibandingkan jenis generator lain untuk rating daya yang sama dan dapat dioperasikan pada kecepatan rendah, sehingga tidak membutuhkan gearbox [5]-[7]. Kelebihan yang dimiliki oleh generator magnet permanen ini membuat generator ini banyak diterapkan pada pembangkit listrik tenaga angin tanpa gearbox yang beroperasi pada putaran rendah [8]-[9]. Berdasarkan pada

fitur-fitur keunggulan yang dimiliki PMSG ini, maka dalam penelitian ini dikembangkan PMSG untuk diterapkan pada pembangkit listrik tenaga angin yang menggunakan turbin angin sumbu horizontal.

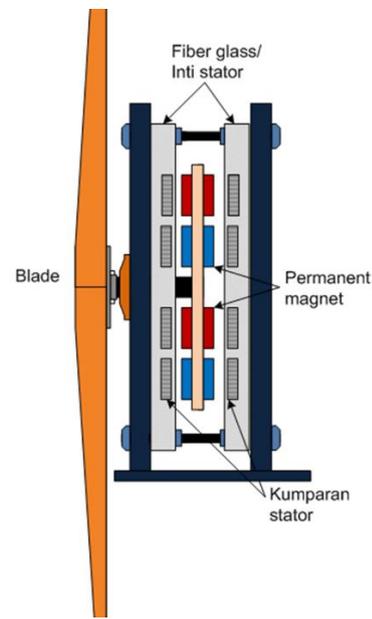
Berdasarkan arah fluksinya, PMSG dapat dikelompokkan atas fluksi radial dan fluksi aksial [10]. Untuk skala kecil, generator magnet permanen fluksi aksial lebih menguntungkan, karena konstruksinya sederhana dan mudah dirancang [11]-[12]. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, PMSG dirancang dalam bentuk fluksi aksial yang disebut juga dengan *Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator* (AFPMSG). Struktur stator dan rotor AFPMSG dibuat dalam bentuk piringan yang saling berhadapan, dimana pada bagian rotor ditempatkan magnet permanen sebagai penghasil medan magnet, sedangkan pada piringan stator dipasang kumparan sebagai penghasil tegangan. Posisi stator dan rotor yang saling berhadapan dan tegak lurus terhadap sumbu, membuat arah fluksi yang dihasilkan medan magnet sejajar dengan sumbu rotor, yang disebut juga dengan fluksi aksial [13].

Tegangan yang dihasilkan oleh AFPMSG dipengaruhi oleh kuat medan magnet dan jumlah kumparan yang digunakan. Semakin kuat medan magnetnya dan semakin banyak lilitan kumparannya, maka tegangan yang dihasilkan juga semakin besar [14]. Untuk mendapatkan tegangan yang lebih besar, telah dikembangkan AFPMSG dengan berbagai konfigurasi stator dan rotor, seperti AFPMSG satu stator satu rotor dan multi stator multi rotor atau disebut juga dengan multistage AFPMSG [14]-[15]. Multistage AFPMSG dapat menghasilkan tegangan yang lebih besar pada putaran rendah, sehingga cocok dipakai pada pembangkit listrik tenaga angin tanpa gearbox yang memiliki kecepatan putaran rendah. Oleh sebab itu, dalam penelitian ini dikembangkan multistage AFPMSG dalam bentuk dua stator satu rotor, dimana kumparan pada rotor ditempatkan 24 magnet Neodymium N52 berukuran 30 x 20 x 4 mm, sedangkan pada masing-masing piringan rotor ditempatkan Sembilan kumparan untuk sistem tiga fasa, sehingga jumlah kumparannya menjadi delapan belas dan enam kumparan setiap fasanya. AFPMSG ini akan dihubungkan secara langsung dengan turbin angin sumbu horizontal dan akan diuji dengan kecepatan putaran yang bervariasi.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan multistage AFPMSG untuk turbin angin putaran rendah. Dengan diperolehnya AFPMSG putaran rendah ini diharapkan dapat memberi manfaat pada pengembangan pembangkit listrik tenaga angin tanpa gearbox di Indonesia.

II. METODE

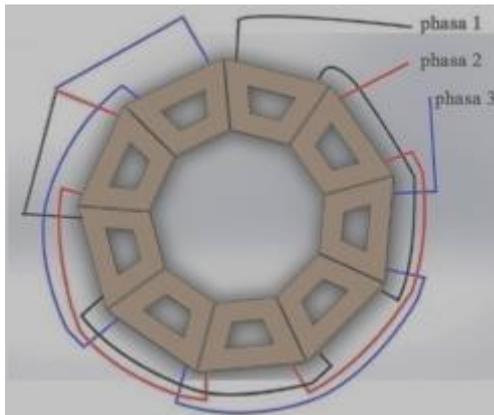
Penelitian ini dilakukan dalam bentuk eksperimen, yang mencakup perancangan, pembuatan dan pengujian multistage AFPMSG untuk turbin angin. AFPMSG dibuat dalam konfigurasi dua stator satu rotor. Gambar 1 menunjukkan rancangan multistage AFPMSG yang akan dibuat dalam penelitian ini.



Gambar 1. Desain multistage AFPMSG

A. Rancangan Stator AFPMSG

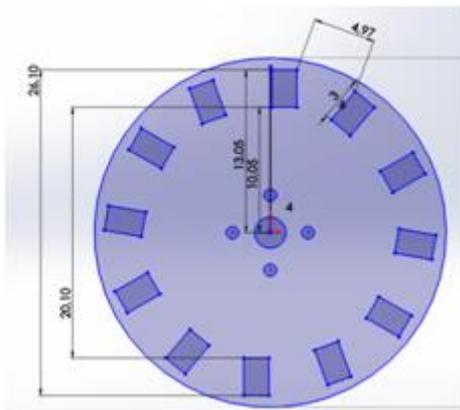
Rancangan stator mencakup perhitungan menentukan jumlah lilitan per kumparan, menentukan diameter kawat email dan menentukan dimensi bodi stator. Stator AFPMSG yang dibuat dalam penelitian ini berupa dua buah piringan dengan inti menggunakan fiberglass. Pada setiap piringan akan ditempatkan 9 kumparan untuk sistem tiga fasa, sehingga jumlah kumparan keseluruhan pada kedua piringan stator adalah 18 buah. Rancangan kumparan stator dihitung untuk mendapatkan tegangan generator sesuai dengan ratingnya, yaitu 24 Volt untuk rating daya 500 Watt 600 rpm. Untuk mendapatkan parameter generator sesuai rating tersebut, maka dilakukan perhitungan sesuai dengan persamaan-persamaan yang dibahas dalam [14]. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh jumlah lilitan per fasanya adalah 760 lilitan. Diameter kawat email yang digunakan adalah 0,5 mm dan besar kumparan tersebut masing-masing sisinya mengikuti lebar dari magnet permanen yang digunakan, yaitu 20 mm. Bodi stator dirancang berbentuk persegi sama sisi dengan ukuran masing-masing sisinya yaitu 40 cm. Gambar 2 menunjukkan bentuk rancangan stator AFPMSG pada satu piringan yang akan dibuat dalam penelitian ini.



Gambar 2. Rancangan stator AFPMSG

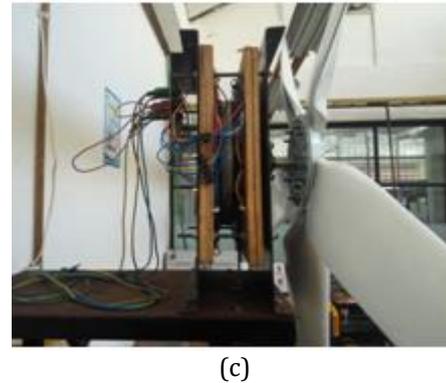
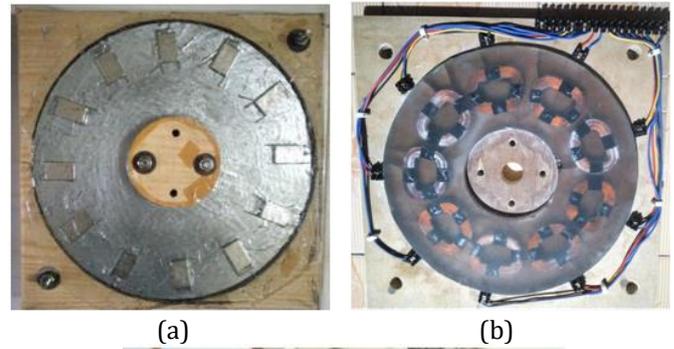
B. Rancangan Rotor

Rotor merupakan bagian yang berputar pada generator. Rotor dirancang dalam bentuk piringan menggunakan plat aluminium. Pada rotor ini ditempatkan magnet permanen Neodymium N52 ukuran 30 x 20 x 4 mm. Magnet permanen ditempatkan pada kedua sisi piringan rotor, sehingga dapat memberikan fluksi yang lebih kuat pada kumparan yang ada pada kedua piringan stator. Setiap sisi piringan rotor ditempatkan 12 buah magnet permanen, sehingga total magnet permanen yang digunakan adalah 24 buah. Diameter piringan rotor yaitu 28 cm dengan radius dalam rotor yaitu 10,05 cm dan radius luar magnet 13,05 cm serta jarak antara magnet adalah 4,97 cm. Gambar 3 menunjukkan rancangan rotor AFPMSG yang dibuat dalam penelitian ini.



Gambar 3. Perancangan rotor

Berdasarkan rancangan stator dan rotor ini, maka selanjutnya dilakukan pembuatan stator dan rotor. Setelah selesai pembuatan stator dan rotor, selanjutnya dilakukan pembuatan bodi untuk dudukan stator, rotor dan blade turbin angin sumbu horizontal, sesuai dengan bentuk AFPMSG seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1. Hasil pembuatan multistage AFPMSG secara keseluruhan yang sudah dipasang turbin angin ditunjukkan oleh Gambar 4.



Gambar 4. Hasil pembuatan AFPMSG. (a) rotor, (b) stator dan (c) multistage AFPMSG

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah selesai membuat AFPMSG, selanjutnya dilakukan pengujian untuk melihat kinerja dari AFPMSG. Pengujian dilakukan dengan menggunakan blower sebagai penghasil kecepatan angin untuk menggerakkan turbin angin sumbu horizontal yang terpasang pada AFPMSG. Generator diuji dengan kecepatan putaran yang bervariasi, dimana untuk mendapatkan variasi kecepatan putaran dilakukan dengan mengatur tegangan motor penggerak blower. Pengujian dilakukan dengan menggunakan alat ukur voltmeter untuk melihat besaran tegangan keluaran AFPMSG dan osiloskop digital untuk melihat bentuk gelombang tegangan AFPMSG. Gambar 5 menunjukkan skema pengujian yang dilakukan di laboratorium.



Gambar 5. Skema pengujian AFPMSG

Pengujian AFPMSG dengan turbin angin sumbu horizontal dilakukan dalam tiga tahap, yaitu pengujian tegangan keluaran kumparan stator piringan 1, pengujian tegangan keluaran kumparan stator piringan 2 dan pengujian tegangan dengan menggabungkan kedua piringan stator.

Pada pengujian piringan stator 1 dan 2, setiap fasa hanya menggunakan 3 buah kumparan. Tabel 1 dan 2 menunjukkan hasil pengujian tegangan pada piringan stator 1 dan 2. Dalam pengujian ini, kecepatan AFPMSG divariasikan mulai dari 100 rpm sampai 150 rpm. Kecepatan putaran AFPMSG diukur dengan menggunakan tachometer digital.

Tabel 1. Tegangan pada stator 1

RPM	TEGANGAN (Volt)					
	R - N	S - N	T - N	R - S	S - T	T - R
100	1,7	1,8	1,6	2,8	2,8	3
150	2,4	2,2	2,2	4,2	4,2	4,2

Tabel 2. Tegangan pada stator 2

RPM	TEGANGAN (Volt)					
	R - N	S - N	T - N	R - S	S - T	T - R
100	2	2,2	2	3,4	3,4	3,4
150	3,6	3,4	3,4	6,4	6,4	6,4

Hasil pengujian pertama dan kedua yang terdapat dalam Tabel 1 menunjukkan bahwa tegangan yang dihasilkan kedua piringan stator sudah mendekati sama dengan perbedaan yang tidak jauh. Saat kecepatan AFPMSG 150 rpm, piringan stator 1 menghasilkan tegangan fasa netral sekitar 2,2 Volt, sedangkan piringan stator 2 dapat menghasilkan tegangan sekitar 3,4 Volt. Tabel 1 dan 2 juga menunjukkan bahwa tegangan setiap fasa pada kedua piringan stator juga sudah seimbang dengan perbedaan di bawah 0,3 Volt pada tegangan fasa netral. Sedangkan pada pengukuran tegangan fasa-fasa, nilai tegangannya sudah sama ketiga fasanya.

Selanjutnya dilakukan pengujian dengan menggabungkan kedua stator. Penggabungan antara kumparan pada stator 1 dengan kumparan pada stator 2 dibuat dalam bentuk hubungan seri, sehingga dalam pengujian ini, setiap fasanya memiliki enam kumparan. Hasil pengujian ketiga ini ditunjukkan oleh Tabel 3 dan Gambar 6. Dalam pengujian ini, kecepatan AFPMSG divariasikan 100 rpm, 150 rpm dan 200 rpm.

Tabel 3. Hasil pengujian double stator

RPM	TEGANGAN (Volt)					
	R - N	S - N	T - N	R - S	S - T	T - R
100	4,4	4,2	4	7	8,2	6,2
150	6	6	5,6	9	11	8
200	7,4	7,4	7	12	14	10

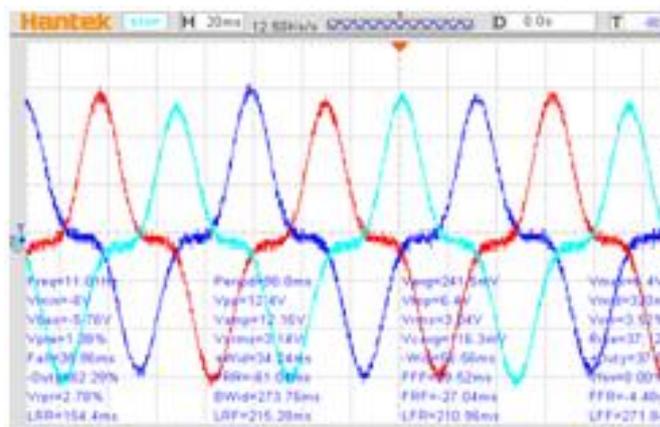


Gambar 6. Pengukurantegangan pada kecepatan 200 RPM

Gambar 6 menunjukkan pengukuran tegangan AFPMSG pada kecepatan 200 rpm. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa tegangan yang dihasilkan oleh AFPMSG lebih besar Ketika kedua kumparan stator digabungkan. Pada saat kedua kumparan stator digabungkan, tegangan fasa netral yang dihasilkan AFPMSG pada kecepatan 150 rpm dapat mencapai 6 Volt, sedangkan pada pengujian masing-masing piringan stator hanya mencapai 3 Volt. Hasil ini menunjukkan bahwa tujuan untuk membuat multistage stator pada AFPMSG untuk menaikkan tegangan keluaran telah tercapai sesuai dengan rencana. Pada kecepatan 200 rpm, tegangan fasa-netral dapat mencapai 7,4 Volt. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan putaran generator maka tegangannya juga semakin naik.

Pengujian ini hanya dapat dilakukan sampai kecepatan 200 rpm karena keterbatasan blower dalam menghasilkan kecepatan angin, sehingga pengujian generator untuk beroperasi pada kecepatan ratingnya 600 rpm tidak dapat dilakukan.

Hasil pengukuran dengan osiloskop juga menunjukkan bahwa bentuk gelombang tegangan keluaran AFPMSG sudah mendekati bentuk sinusoidal untuk sistem tiga fasa. Gambar 7 menunjukkan bentuk tegangan keluaran AFPMSG pada osiloskop pada saat kecepatan putaran 200 rpm.



Gambar 7. Gelombang tegangan keluaran AFPMSG

IV. PENUTUP

Dalam penelitian ini dilakukan pembuatan multistage AFPMSG untuk turbin angin dengan tujuan untuk menaikkan tegangan keluaran generator. AFPMSG dibuat dalam bentuk dua stator satu rotor, dimana setiap stator menggunakan Sembilan kumparan, sedangkan pada rotor dipasang 24 magnet permanen Neodymium N52 30 x 20 x 4 mm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tujuan membuat multistage AFPMSG untuk menaikkan tegangan keluaran generator telah tercapai, dimana tegangan keluaran yang dihasilkan oleh gabungan kedua piringan stator lebih besar dari tegangan keluaran dari masing-masing piringan stator.

REFERENSI

- [1] F. J. Gierass., et al. Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machine, Second Edition, New York : Springer. 2008
- [2] D. Xie, Y. Lu, J. Sun and C.Gu, "Small signal stability analysis for different types of PMSGs connected to the grid," *Renewable Energy*, vol. 106, pp. 149-164, June 2017.
- [3] P. Jin, Y. Yuan, J. Minyi, F. Shuhua, L. Heyun, H. Yang dan S. L. Ho. "3-D analytical magnetic field analysis of axial flux permanent-magnet machine," *IEEE Transaction on Magnetic.*, Vol. 50, Hal. 1-4. 2014.
- [4] Muljadi, P. Sardjono dan Suprapedi. "Preparation and characterization of 5 wt. Persen epoxy resin bonded magnet NdFeB for micro generator application," *Energy Procedia*, vol. 68, pp. p282 - 287. 2015.
- [5] M. Yuhendri dan Aslimeri. "Optimum torque control of direct driven wind energy conversion systems fed sparse matrix converter," *Journal of Electrical System*, vol. 14, pp. 12-25, 2018.
- [6] J. C. Bai, W. C. Wang, P. W. Chen dan W. T. Chong. "System integration of the horizontal-axis wind turbine: the design of turbine blades with an axial-flux permanent magnet generator," *Energies*, vol. 7, pp. 7773-7793, 2014.
- [7] M. Yuhendri, M. Ashari and M. H. Purnomo. "A novel sensorless MPPT for wind turbine generators using very sparse matrix converter based on hybrid intelligent control," *International Review of Electrical Engineering.*, vol. 10, pp. 233-243. 2015.
- [8] N. S. Patil and Y. N. Bhosl, "A review on wind turbine generator topologies," in *Proc. ICPEC*, 2016, pp. 625-629.
- [9] A. Bonfiglio, F. Delfino, F. G. Longatt and R. Procopio, "Steady-state assessments of PMSGs in wind generating units," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems.*, vol. 90, pp. 87-93, September 2017.
- [10] T. Ishikawal, S. Amada, K. Segawa dan N. Kurita. "Proposal of a radial and axial-flux permanent magnet synchronous generator," *IEEE Transaction on Magnetic.*, vol. 53, pp. 1-4. 2017.
- [11] R. D. Chavan and V.N. Bapat., "The study of different topologies of axial flux permanent magnet generator," in *Proc. ICACDOT*, 2016, pp. 202.
- [12] A. Daghigh, H. Javadi and H. Torkaman, "Design optimization of direct-coupled ironless axial flux permanent magnet synchronous wind generator with low cost and high annual energy yield," *IEEE Transaction on Magnetic.*, vol. 52, pp. 1-10, April 2016.
- [13] G. Ahmad and U. Amin, "Design, construction and study of small scale vertical axis wind turbine based on a magnetically levitated axial flux permanent magnet generator," *Renewable Energy.*, vol. 101, pp. 286-292, February 2017.
- [14] M. Yuhendri, M. Muskhir, Taali and Ahyanuardi. "Implementation of Three Phase Axial Flux Disc Permanent Magnet Generator for Low Speed Horizontal Axis Wind Turbine," *IJASEIT*, vol. 11, pp. 210-230. Agustus 2021.
- [15] S. J. Arand and M. Ardebili., "Multi-objective design and prototyping of a low cogging torque AFPM generator with segmented stator for small scale direct drive wind turbines," *IET Electric Power Applications.*, vol. 10, pp. 889-899. 2016.

Biodata Penulis

Febri Angriawan, lahir di Sungai Kambut, 14 Februari 1996. Menyelesaikan Program Studi DIV Teknik Elektro Industri pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang.

Dr. Muldi Yuhendri, S.Pd, M.T, lahir di Kampung Aur tanggal 13 Desember 1981, menyelesaikan S1 Pendidikan Teknik Elektro di Universitas Negeri Padang pada tahun 2005, menyelesaikan S2 Teknik Elektro Sistem Tenaga di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) pada tahun 2009, dan menyelesaikan S3 Ilmu Teknik Elektro di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) pada tahun 2017. Bekerja sebagai dosen di jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang dari tahun 2006 hingga sekarang.