

PENERAPAN ANALOG MODULASI LEBAR PULSA MENGUBAH DAYA DC KE DAYA AC 3 FASA UNTUK MEMUTAR MOTOR BLDC TIGA FASA

Noer Soedjarwanto¹, Syaiful Alam², Endah Komalasari³, dan Muhammad Abdullah Umar⁴

^{1,2,3,4}Universitas Lampung; Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Kota Bandar Lampung, Lampung, 35141, Indonesia

Received: 4 September 2024

Accepted: 5 Oktober 2024

Published: 12 Oktober 2024

Keywords:

Bldc motor;

Pulse width modulation;

Inverter tiga fasa.

Correspondent Email:

Muhhammad.abdullah106219@students.unila.ac.id

Abstrak. Teknologi yang kian pesat berkembang selaras dengan energi yang dikonsumsi memberikan dampak negatif kepada sumber energi listrik konvensional serta mengakibatkan kerusakan lingkungan yang dimana perlunya alternatif energi yaitu energi baru terbarukan (EBT). Energi baru terbarukan ini menghasilkan energi listrik dalam bentuk arus searah (DC) yang perlu diubah menjadi arus bolak-balik (AC). Maka, hasil energi listrik yang diproduksi EBT dapat dikonversi menjadi arus bolak-balik dengan menggunakan inverter. Maka penelitian disini adalah untuk simulasi dan membuat inverter tiga fasa untuk mengubah energi listrik DC menjadi AC tiga fasa lalu dihubungkan ke motor bldc tiga fasa dengan berbagai frekuensi. Inverter memerlukan sebuah sistem kontrol dalam pensaklaran transistor daya, dimana metode yang digunakan adalah *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) yang dimana metode ini membandingkan dua gelombang yaitu gelombang fundamental (sinus) dan gelombang karir (segitiga) dimana hasil dari perbandingan ini yang dipanggil sebagai SPWM yang nantinya digunakan untuk pensaklaran transistor daya pada inverter. Keluaran dari inverter disambungkan ke motor bldc tiga fasa lalu diukur kecepatannya menggunakan tachometer serta frekuensi yang dikeluarkan dapat divariasikan dengan mengatur frekuensi gelombang fundamental dengan menggunakan mikrokontroler. Konklusi yang dapat diambil dari penelitian ini mendemonstrasikan bahwa kecepatan pada kecepatan motor bldc tiga fasa yang mana berbanding lurus terhadap frekuensi.

Abstract. Technology that is increasingly developing rapidly in line with the energy it consumes has a negative impact on conventional electrical energy sources and causes environmental damage, which requires alternative energy, namely new, renewable energy (EBT). This new renewable energy produces electrical energy in the form of direct current (DC) which needs to be converted into alternating current (AC). So, the electrical energy produced by EBT can be converted into alternating current using an inverter. So the research here is to simulate and create a three-phase inverter to convert DC electrical energy into three-phase AC and then connect it to a three-phase bldc motor with various frequencies. Inverters require a control system for switching power transistors, where the method used is *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM), where this method compares two waves, namely the fundamental wave (sine) and the career wave (triangle), where the result of this comparison is called SPWM. which will later be used for switching power transistors in the inverter. The output from the inverter is connected to a three-phase bldc motor and its speed is measured using a tachometer and the output frequency can be varied by adjusting the fundamental wave frequency using a microcontroller. The conclusion that can be drawn from this research

demonstrates that the speed of a three-phase bldc motor is directly proportional to frequency.

1. PENDAHULUAN

Dalam dekade terakhir ini, populasi manusia meningkat dengan drastis serta permintaan akan listrik meningkat secara eksponensial dari hari ke hari. Sumber energi baru terbarukan (EBT) merupakan solusi yang digunakan pada banyak negara sebagai alternatif energi listrik yang ramah lingkungan. Dimana pengembangan teknologi yang disebut sebagai inverter digunakan dengan mengubah hasil energi EBT yaitu dari energi listrik DC menjadi energi listrik AC. Energi listrik DC yang dihasilkan akan di simpan pada baterai lalu dikonversi menjadi energi listrik AC dengan menggunakan inverter yang mana hasil konversi tersebut di teruskan ke jaringan listrik untuk di distribusikan. Sebagian besar peneliti telah menemukan banyak jenis teknik modulasi. Salah satu teknik modulasi paling populer adalah modulasi lebar pulsa (PWM) [1]. Ini dapat mengontrol sensor analog dengan output digital.

Pada tahun 1945 terdapat banyak sistem jaringan distribusi listrik DC ke DC yang di implementasikan di seluruh dunia dimana beberapa peralatan seperti alat daya, radio, TV yang berkerja dengan menggunakan sumber daya AC tidak dapat digunakan [1]. Maka dengan ini, masyarakat mengalami beberapa permasalahan yang mana dunia tidak bisa bekerja dengan hanya menggunakan satu jenis sumber daya. Maka karna itu, ia menjadi hal yang vital perlunya kemudahan dalam memproduksi energi listrik yang dapat mengubah dari daya DC ke daya AC dimana alat tersebut adalah inverter.[2]

Selain itu, pengembangan penggerak motor yang memiliki performa tinggi merupakan suatu faktor penting dalam aplikasi industri serta tujuan lain seperti pabrik penggulung baja, mobil listrik, penerbangan dan robotika. Beberapa jenis motor listrik yang diusulkan untuk digunakan dalam pengaplikasian ini dan salah satunya adalah motor DC memiliki karakteristik yang sangat baik [3]. Motor *brushless* DC luas digunakan dalam aplikasi industri yang mana memiliki kelebihan yang berbeda berbanding motor

konvensional lainnya seperti memiliki karakteristik kecepatan dan torsi, respon dinamika yang lebih baik, efisiensi tinggi, julat kecepatan yang luas dan rasio berat-torsi yang tinggi [4]. Berbeda dengan motor dc konvensional, motor bldc ini tidak memiliki sikat, maka komutasi bekerja secara elektronik dan motor bldc ini memiliki bentuk yang mirip dengan motor sinkron tiga fasa dikarenakan oleh permanen magnet.

Selanjutnya, peningkatan distorsi harmonisa yang disebabkan oleh kelebihan dalam menggunakan beban nonlinear seperti pengaturan kecepatan motor, sistem sumber daya, sistem pengisi baterai dan lain-lain. Dimana peralatan tersebut menyumbang arus harmonisa pada power sistem dan menyebabkan distorsi harmonisa yang mengakibatkan meningkatnya malfungsi pada peralatan yang sensitif atau mengganggu sistem komunikasi [5].

2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Inverter

Perkembangan teknologi yang pesat dalam kurun dekade ini memperlihatkan bahwa semakin banyak mengandalkan perangkat elektronik dan sumber alternatif yaitu energi baru terbarukan (EBT), inverter yang memiliki peran penting dalam memfasilitasi konversi daya yang memerlukan sistem arus bolak balik. Inverter memiliki prinsip fundamental yaitu dengan mengubah arus searah menjadi arus bolak balik yang secara periodik membalikkan arah. Perubahan ini terjadi melalui beberapa komponen elektronik dan proses modulasi elektronik untuk mengubah arah dan memberikan output gelombang ac yang kompatibel terhadap perangkat yang beroperasi AC. Perangkat utama dalam perubahan ini adalah komponen pengsaklaran dimana digunakan dengan cepat untuk mematikan atau menghidupkan input DC dan mengubah bentuk output serta polaritas secara bergantian

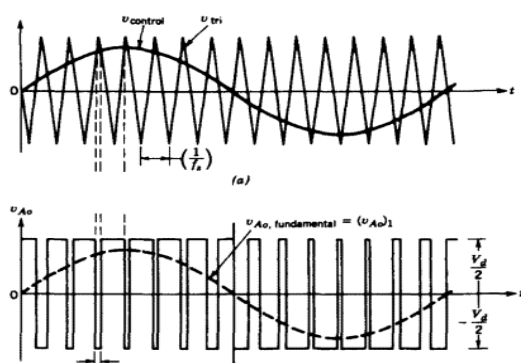
B. Pengaplikasian Mosfet

Inverter adalah rangkaian atau komponen yang digunakan untuk mengubah tegangan DC

(searah) menjadi AC (bolak-balik) dengan gelombang Sinus dimana lebih tepatnya mengkonversi tegangan dari sumber DC ke beban AC dan arus AC-nya memiliki komponen fundamental dengan frekuensi dan amplitude yang dapat divariasikan. Inverter yang *Total Harmonic Distortion* (THD) yang kecil dibawah 5%[14]. baik, adalah inverter yang memiliki Contoh sumber tegangan inverter dapat berupa baterai, Panel Surya dan sumber DC lainnya. Secara umum, komponen utama yang digunakan dalam rangkaian inverter, biasanya memerlukan komponen semikonduktor pensaklaran berupa IGBT, MOSFET, TRIAC maupun SCR. Pada rangkaian inverter 3 fasa, memerlukan 6 komponen semi konduktor membuat *bridge* inverter 3 fasa.

C. Pulse width modulation

Metode *pulse width modulation* (PWM) atau modulasi lebar pulsa digunakan untuk menghasilkan gelombang pulsa yang dapat dirubah sesuai dengan perubahan yang digunakan berupa gelombang Sinus. Pada metode ini merupakan suatu Teknik yang membandingkan sinyal *reference* (V_r) dengan sinyal *Carrier* (V_c) digunakan komparator. Beberapa contoh pengimplementasian PWM adalah pengontrolan daya, regulator tegangan, pemodulasian data untuk telekomunikasi, penguatan serta aplikasi-aplikasi lainnya. Prinsip kerja PWM adalah mengatur lebar pulsa yang mengikuti gelombang Sinus dimana komparator digunakan untuk membandingkan gelombang Sinus dan gelombang segitiga. Apabila nilai tegangan Sinus lebih besar dari tegangan segitiga maka *output* komparator akan bernilai 1 atau *high*. Namun jika tegangan Sinus lebih kecil dari tegangan segitiga maka *output* komparator akan bernilai 0 atau *low*[15].



Gambar 1. Skema pembentukan sinyal PWM

Proses membandingkan memodulasikan sinyal *carrier* yaitu digunakan sinyal sinus dengan amplitude dan frekuensi maksimum. Frekuensi sinyal segitiga tidak boleh lebih besar dibandingkan dengan gelombang *carrier*, gelombang pemodulasi (sinyal sinus) dimana perbandingan ini disebut sebagai indeks modulasi amplitude [16].

D. Gate Driver

Komponen elektronika yaitu *Gate Driver* merupakan sebuah rangkaian elektronika yang memiliki fungsi sebagai gerbang (pemisah) antara saklar daya dengan *microcontroller*. *Gate Driver* ini juga digunakan sebagai penguat tegangan input yang kecil dari sebuah *microcontroller* sehingga menghasilkan tegangan input yang lebih besar maka dapat memicu aktifnya saklar daya serta memenuhi syarat untuk mengaktifkan *gate* pada saklar daya dan akan terjadinya pensaklaran[17]. Misalnya, *Gate Driver* dapat digunakan sebagai penguat tegangan dari *microcontroller* yang nilai outputnya sebesar 3.3V atau 5V menjadi lebih besar dan sesuai dengan tegangan yang diperlukan untuk memicu *gate* pada saklar daya yang nilainya bervariasi. Oleh karena itu, *Gate Driver* diperlukan terutama pada rangkaian konversi daya seperti *inverter*, *rectifier*, dan DC-DC konversi seperti *buck*, *boost*, dan *buck boost* konverter.

E. Mikrokontroler

Mikrokontroler merupakan suatu rangkaian terpadu elektronik yang berfungsi sebagai pengendali yang mengatur jalannya proses kerja dari suatu rangkaian elektronik. Dimana Arduino adalah perangkat mikrokontroler yang bersifat *open source*, dan Arduino juga modul mikrokontroler yang sangat populer saat ini, terdapat berbagai macam jenis Arduino dengan sesuai kebutuhan. Pemrograman Arduino menggunakan bahasa pemrograman tersendiri. Arduino memiliki peran penting dalam pengontrolan berbagai macam perangkat dan rangkaian elektronik, maupun pengendalian berbagai macam motor [17]

F. Digital to analog converter

Pada Teknologi sekarang, dimana pengkonversian informasi digital ke sinyal analog memiliki peran yang penting dalam

berbagai bidang, dari produksi audio hingga telekomunikasi. Inti dari transformasi ini ada pada *digital to analog converter* (DAC), sebuah komponen fundamental yang menyebrangi ruang diantara dunia biner (*digital information*) dan sinyal analog. DAC merupakan perangkat elektronik yang mengubah data digital, biasanya dalam bentuk kode biner menjadi sinyal analog. Dimana tujuan utamanya adalah untuk membuat ulang bentuk gelombang yang diberikan dari data digital, yang memungkinkan transmisi atau reproduksi informasi dalam format analog. Prinsip kerja DAC secara umum adalah *sampling* dan rekonstruksi. Dimana *sampling* merupakan input sinyal digital yang di sampel pada interval regular. Sinyal digital yang berisi dalam nilai biner (0 dan 1) merupakan representasi dari sample diskrit pada sinyal analog. Rekonstruksi adalah sebuah proses apabila DAC mengkonstruksi ulang dari sampel diskrit ke gelombang analog yang diinginkan, ini merupakan proses konversi setiap nilai biner yang koresponding pada tegangan atau arus analog.

G. Motor BLDC tiga fasa

Motor BLDC (*Brushless DC*) tiga fasa adalah jenis motor listrik yang beroperasi menggunakan suplai daya tiga fasa dimana motor ini juga dikenal sebagai motor listrik *synchronous AC 3 fasa*. Dibandingkan dengan motor DC, BLDC memiliki biaya perawatan yang lebih rendah dan kecepatan yang lebih tinggi akibat tidak menggunakan *brush*. Selain itu, motor BLDC memiliki efisien yang lebih tinggi berbanding motor induksi karena rotor dan torsi awal yang besar disebabkan oleh rotor terbuat dari magnet permanen serta kecepatan pada motor ini dapat di variasikan dengan mengubah frekuensi atau *duty cycle*[19]. *Duty cycle* (D) yang mana bisa di presentasikan dengan rumus $D = (T_{on}/T_{total}) \cdot 100\%$, Sudut penyalan pada motor bldc merujuk pada posisi relatif dari medan magnet stator terhadap rotor saat arus dialirkan ke belitan motor., peralatan automasi industri dan instrumentasi. Dimana kecepatan pada motor BLDC tiga fasa ini dapat dihitung dengan menggunakan rumus dibawah.

Estimasi kecepatan,

$$N_s = \frac{120f}{p}$$

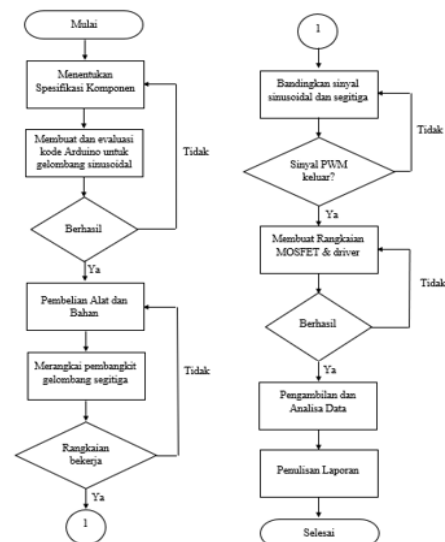
Ns : Kecepatan motor tiga fasa bldc

f : Frekuensi pada output daya tiga fasa

p : Jumlah kutub pada motor tiga fasa bldc

3. METODE PENELITIAN

A. Tahap penelitian



Gambar 2. Flow chart penelitian

Gambar 2 adalah *flow chart* menunjukkan metodologi yang digunakan pada penelitian ini. Pada penelitian ini menggunakan Arduino dalam pembangkitan gelombang Sinus tiga fasa dan sinyal gelombang segitiga dibangkitkan menggunakan *operational amplifier* (op-amp). Kemudian, dua sinyal tersebut dibandingkan menggunakan komparator untuk menghasilkan PWM. Setelah itu, PWM yang dihasilkan akan dikirimkan ke IR2110 *driver* dan *bootstrap capacitors* untuk dihantar ke rangkaian MOSFET yang akan mengkonversi tegangan DC menjadi tegangan AC

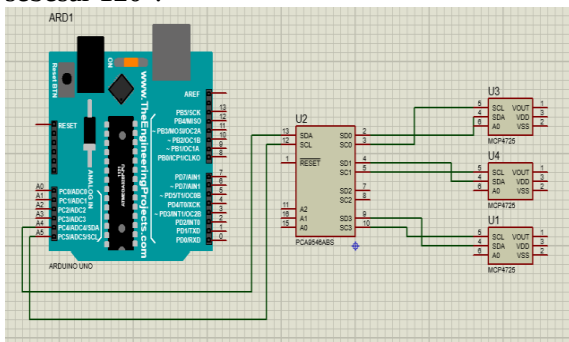
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan hasil dan pembahasan pada penelitian ini. Hasil dari penelitian ini didapatkan dari rangkaian alat yang dilakukan melalui eksperimental. Penelitian ini memiliki fokus utama yaitu dalam membangkitkan modulasi lebar pulsa (*Pulse Width Modulation*) dengan membandingkan sinyal Sinus yang dibangkitkan oleh mikrokontroler dan sinyal segitiga yang diperoleh dari rangkaian analog dengan menggunakan *operational amplifier*

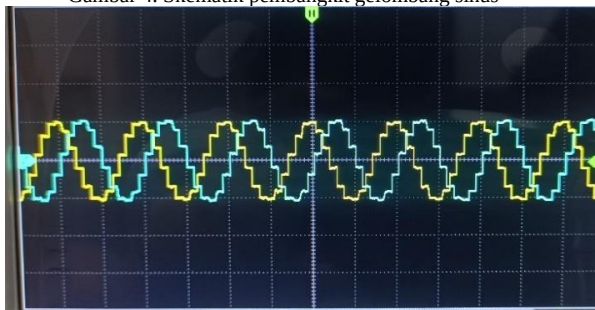
(op-amp). Output dari PWM tersebut akan dihubungkan ke *gate driver* untuk mengontrol kaki *gate* pada transistor.

A. Pembangkit gelombang sinus

Beberapa komponen diperlukan dalam pembangkitan gelombang Sinus, dimana dalam penelitian ini menggunakan Arduino Uno, *Multiplexer* yaitu PCA9548A dan *digital to analog converter* yaitu MCP4725. Arduino uno digunakan untuk menghasilkan output digital lalu dihubungkan ke PCA954Aa sebagai bus yang mana akan dihubungkan ke MCP4725 untuk membangkitkan gelombang Sinus. Gelombang Sinus yang dibangkitkan memiliki V_{pp} 5V, frekuensi 50Hz dan perbedaan fasa sebesar 120° .



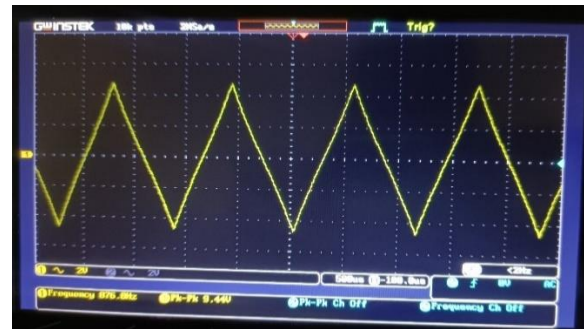
Gambar 4. Skematik pembangkit gelombang sinus



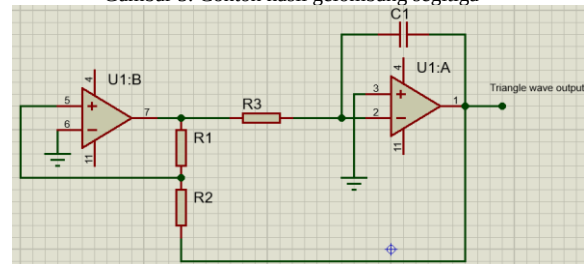
Gambar 5. Contoh hasil gelombang sinus

B. Pembangkit gelombang segitiga

Pembangkitan gelombang segitiga menggunakan beberapa komponen IC TL074 yaitu sebuah *operational amplifier* (op-amp), resistor dan kapasitor seramik. Dua op-amp digunakan untuk membangkitkan gelombang segitiga, dimana op-amp pertama sebagai *schmitt trigger* yang outputnya merupakan gelombang kotak dan op-amp kedua sebagai integrator yang outputnya merupakan gelombang segitiga. Gelombang segitiga memiliki V_{pp} 6.5V dan frekuensi 1KHz.



Gambar 5. Contoh hasil gelombang segitiga



Gambar 6. Skematik pembangkit gelombang segitiga

Perhitungan dalam pembangkitan gelombang segitiga dengan output yang diinginkan yaitu Tegangan *peak to peak* (V_{p-p}) 6.5V dan frekuensi 1.04 kHz dengan tegangan saturasi 12V. maka,

Estimasi tegangan *peak to peak* (V_{p-p}):

$$V_{p-p} = 2 \times \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \times V_{sat}$$

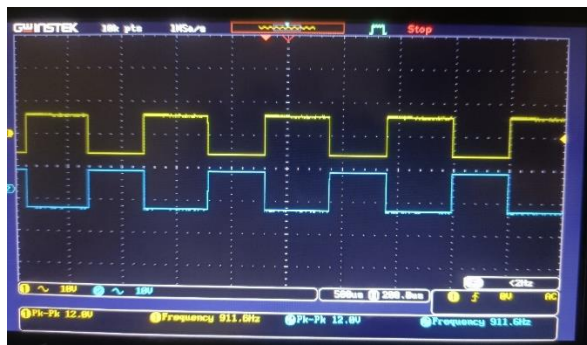
Estimasi frekuensi sinyal:

$$f = \frac{R_1}{4(R_3)(R_2) \times C_1}$$

Diketahui bahwa parameter yang dihasilkan pada estimasi perhitungan dan data aktual yang diperoleh berbeda dikarenakan oleh toleransi (%) pada setiap komponen

C. Komparator dan not gate

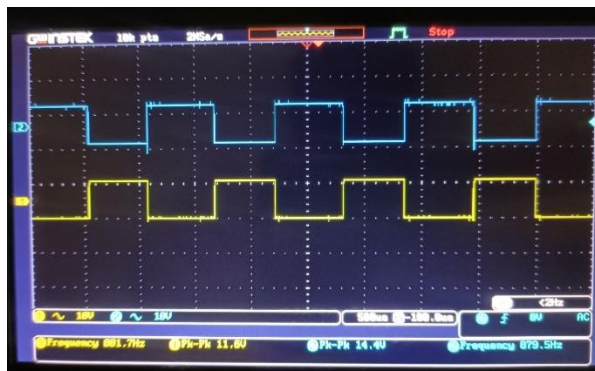
Gelombang Sinus dan segitiga yang telah dibangkitkan akan dihubungkan ke op-amp yang berfungsi sebagai komparator, dimana komparator pada penelitian ini menggunakan IC LM311. Komparator ini akan membandingkan gelombang Sinus dan segitiga, dimana saat gelombang segitiga lebih besar maka *output* komparator menjadi *high* jika kebalikkannya maka *output* komparator menjadi *low*. Output pada komparator akan dihubungkan ke IC CD4069 yang bertindak sebagai *not gate*. Dimana *not gate* ini berfungsi membalikkan sinyal *input* atau sebagai komplementer.



Gambar 7. Hasil komparator dan not gate

D. Gate driver IR2110

IR2110 merupakan *gate motor driver* untuk mosfet, dimana IC ini memiliki dua *output* untuk *high* dan *low side* serta rangkaian *bootstrap capacitors* yang akan menerima tegangan 12V maka tegangan maksimal untuk sinyal PWM tiga fasa adalah 12V dan *voltage threshold* adalah 4V.



Gambar 8. Hasil sinyal gate driver lowside dan highside

E. Rangkaian MOSFET

Untuk mengubah tegangan DC ke tegangan AC tiga fasa maka sinyal tiga fasa dikirim ke MOSFET dari *gate driver* IR2110. Rangkaian MOSFET diperlihatkan pada gambar 9 *Output* dari MOSFET adalah tegangan *line to line* yang ditunjukkan pada gambar 10.



Gambar 9. Rangkaian MOSFET



Gambar 10. Hasil tegangan line-line

F. Hubungan antara frekuensi dan kecepatan motor bldc tiga fasa

Pada percobaan ini, frekuensi output inverter yang digunakan adalah 30Hz, 40 Hz, 50Hz, 60Hz, dan 70Hz. Terlihat pada tabel dan grafik dibawah yang memperlihatkan data yang didapatkan dalam hubungan frekuensi inverter dan kecepatan pada motor tiga fasa bldc secara praktis (Kecepatan 1) dan teori (Kecepatan 2).

Frekuensi (Hz)	Kecepatan 1 (rpm)	Kecepatan 2 (rpm)	Margin error (%)
30	257	257.14	0.06
40	342	343.85	0.56
50	428	428.57	0.14
60	514	514.28	0.06
70	600	600	0.00

Gambar 11. Hubungan frekuensi dan kecepatan pada motor tiga fasa bldc secara praktis dan teori

Pada tabel diatas terlihat hubungan antara frekuensi dan kecepatan pada motor tiga fasa bldc. Dimana jika dibandingkan, hasil kecepatan yang diperoleh secara praktis dan teori hampir identik. Data-data ini menunjukkan bahwa peningkatan frekuensi akan menyebabkan meningkatnya kecepatan pada motor tiga fasa bldc yang mana frekuensi dan kecepatan memiliki hubungan berbanding lurus

5. KESIMPULAN

- Pulse width modulation* (PWM) yang dibangkitkan dalam pensaklaran MOSFET adalah dengan membandingkan dua gelombang yaitu gelombang sinus dan gelombang segitiga.
- Hasil percobaan motor tiga fasa bldc secara demonstrasi alat dan teori yang didapatkan bahwa semakin

tinggi frekuensi maka semakin tinggi kecepatan motor.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. H. Suharti, H. M. Kristiana, and R. N. Amalia, "Design of flow control system based on PLC armfield pressure control module in chemical engineering laboratory," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1073, no. 1, p. 012053, Feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1073/1/012053.
- [2] P. N. Astya, M. Singh, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Institute of Electrical and Electronics Engineers. Uttar Pradesh Section, and Sharda University. School of Engineering and Technology, *Design and Implementation of SPWM Inverter*.
- [3] International Network of Mechatronics Universities, Higher Technological Institute, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *Speed Control of BLDC Motor By Using PID Control and Self-tuning Fuzzy PID Controller*.
- [4] Md. Mustafa Kamal and Lini Mathew, "Speed Control of Brushless DC Motor Using Intelligent Controllers.
- [5] T. L. Lee, Y. C. Wang, J. C. Li, and J. M. Guerrero, "Hybrid active filter with variable conductance for harmonic resonance suppression in industrial power systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 2, pp. 746–756, Feb. 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2347008.
- [6] Agus Sugiyono, "PENANGGULANGAN PEMANASAN GLOBAL DI SEKTOR PENGGUNA ENERGI," 2006-archive/macros/latex/contrib/supported/IEEEtran/
- [7] "Rumah Tropis Hemat Energi-PRIANTO".
- [8] M. Azhar and D. Adam Satriawan, "Implementasi Kebijakan Energi Baru dan Energi Terbarukan Dalam Rangka Ketahanan Energi Nasional," 2018.
- [9] M. Azhar and D. Adam Satriawan, "Implementasi Kebijakan Energi Baru dan Energi Terbarukan Dalam Rangka Ketahanan Energi Nasional," 2018.
- [10] H. Asyari, R. Achmad Firmansyah, and M. Kusban, "ANALISA TINGKAT POTENSI SINAR MATAHARI UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA DI DAERAH PANTAI," pp. 82–89, 2020,
- [11] B. Hari Purwoto, E. Penggunaan Panel Surya Sebagai Sumber Energi Alternatif, M. F. Alimul, and I. Fahmi Huda, "EFISIENSI PENGGUNAAN PANEL SURYA SEBAGAI SUMBER ENERGI ALTERNATIF"
- [12] D. Dzulfikar and W. Broto, "OPTIMALISASI PEMANFAATAN ENERGI LISTRIK TENAGA SURYA SKALA RUMAH TANGGA," Universitas Negeri Jakarta, 2016, pp. SNF2016-ERE-73-SNF2016-ERE-76. doi: 10.21009/0305020614
- [13] Z. Iqimal, I. D. Sara, and D. Syahrizal, "APLIK F. Hidayat and K. Krismadinata, "Rancang Bangun VVVF Inverter 3 Fasa untuk Operasi Motor Induksi Tiga Fasa dengan Antarmuka Komputer," *INVOTEK: Jurnal Inovasi Vokasional dan Teknologi*, vol. 19, no. 2, pp. 47–56, Oct. 2019, doi: 10.24036/invotek.v19i2.609.
- [14] David Nugraha and Krismadinata, "Rancang Bangun Inverter Satu Fasa Dengan Dengan Modulasi Lebar Pulsa PWM Menggunakan Antarmuka Komputer," *JTEV (JURNAL TEKNIK ELEKTRO DAN VOKASIONAL)*, 2020, [Online]. Available: <http://ejournal.unp.ac.id/index.php/jtev/index>
- [15] N. Mohan, Undeland Tore, and Robbins William, "POWER ELECTRONICS," 1995.
- [16] Lalu Riza Aliyan, Rini Nur Hasanah, and M. Aziz Muslim, "Desain Inverter Tiga Fasa dengan Minimum," *Jurnal EECCIS*, vol. Vol. 8, No. 1, pp. 79–84, 2014.
- [17] F. Hidayat and K. Krismadinata, "Rancang Bangun VVVF Inverter 3 Fasa untuk Operasi Motor Induksi Tiga Fasa dengan Antarmuka Komputer," *INVOTEK: Jurnal Inovasi Vokasional dan Teknologi*, vol. 19, no. 2, pp. 47–56, Oct. 2019.