

Pengendalian Motor *Brushless Direct Current* dengan Frekuensi Tinggi *Pulse Width Modulation* Dengan Metode *Back-Electromotive Force* Menggunakan *Microcontroller*

Charles Ronald Harahap¹, Endah Komalasari², Bangkit Gigih Nugroho³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung, Bandar Lampung

Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No.1 Bandar Lampung 35145

¹charles.harahap69@gmail.com

Intisari — Penelitian tentang pengendalian kecepatan motor listrik mengalami perkembangan, khususnya motor *brushless direct current* (BLDC). Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan pengendalian dengan teknik *pulse width modulation* (PWM) menggunakan besarnya tegangan dan *duty cycle* untuk mengatur kecepatan motor. Metode PWM merupakan metode yang banyak digunakan dalam pengendalian kecepatan motor BLDC. Pada penelitian ini akan membahas tentang pengendalian kecepatan motor BLDC menggunakan metode modulasi PWM dengan frekuensi switching sebesar 20 KHz dan frekuensi sumber yang dihasilkan dari arduino mencapai 300 Hz. Pada penelitian ini akan melakukan dua pengujian, yaitu pengujian tanpa beban dan berbeban. Dari kedua pengujian yang telah dilakukan, diperoleh data berupa besarnya kecepatan, daya dan torsi pada motor berdasarkan perubahan frekuensi sumber. Pengujian tanpa beban kecepatan maksimal yang dihasilkan 14.328 rpm, daya sebesar 71,2 watt dan torsi 0,047Nm. Sedangkan pengujian berbeban, kecepatan maksimal yang dihasilkan 12.060 rpm, daya sebesar 79,3 Watt dan torsi 0,062Nm.

Kata kunci — motor BLDC, *Pulse Width Modulation*, Variabel Frekuensi, Arduino Mega 2560.

Abstract — Research on speed control of electric motor has developed, especially the BLDC motor. In previous research, the pulse width modulation (PWM) has been controlled using the voltage and duty cycle to control the motor speed. The PWM method is a method that is widely used in controlling BLDC motor speed. This research will discuss controlling the speed of BLDC motor using the PWM modulation method with the switching frequency of 20 KHz and the frequency generated from arduino reaches 300 Hz. In this study, two tests will be carried out, namely no load and loaded tests. From the two tests that have been carried out, data is obtained in the form of the speed, power, and torque on the motor based on changes in the frequency. The no-load test produces a maximum speed of 14,328 rpm, a power of 71,2 watts, and torque of 0,047 Nm. While the load test, the resulting maximum speed is 12,060 rpm, power is 79,3 watts, and torque is 0.062 Nm.

Keywords— bldc motor, pulse width modulation, frequency variable, Arduino Mega 2560

I. PENDAHULUAN

Dalam pengendalian kecepatan motor *brushless direct current* (BLDC) dibutuhkan sistem kendali yang stabil, respon yang tinggi pada *step response* dan *disturbance response*. Kecepatan motor BLDC dapat kembali pada kondisi tunak (*steady state*) dengan cepat apabila terjadi gangguan atau dibebani. Untuk mencapai kondisi ini, suatu metode frekuensi *switching pulse width modulation* (PWM) yang tinggi diterapkan pada sistem kendali kecepatan motor searah tanpa sikat. Frekuensi tinggi PWM ini digunakan untuk memodulasi komponen switching yaitu MOSFET pada rangkaian inverter [1-3]. Hal inilah yang melatar belakangi penelitian ini, di mana motor searah tanpa sikat ini

merupakan motor dengan kecepatan yang tinggi membutuhkan kestabilan dalam operasinya. Motor *Brushless DC* mempunyai tiga masukan pada lilitan koilnya serta menggunakan magnet permanen pada kutub rotor, dan memerlukan tegangan AC agar dapat berputar.

Tegangan AC sendiri diperoleh dari hasil pensaklaran pada perangkat elektronika daya berbahan semikonduktor, yaitu dengan mengubah tegangan arus searah (DC) menjadi tegangan bolak-balik (AC) yang dapat diatur sesuai kebutuhan menggunakan inverter [4]. Tegangan AC yang dihasilkan inverter ini berfungsi untuk membangkitkan medan magnet yang berputar.

Secara garis besar, prinsip kerja motor BLDC mengacu pada sifat magnet, yang di

mana akan tarik – menarik apabila kutub berbeda dan akan saling tolak – menolak apabila pada kutub yang sama. Dengan mengacu pada sifat magnet tersebut, motor BLDC dapat berputar [5]. Dengan begitu, ketika motor BLDC menerima tegangan AC pada inverter, terjadi gaya elektromagnet pada kumparan stator dengan polaritas yang berbeda pada ketiga koil masukan, dengan polaritas yang berubah – ubah pada kumparan stator tersebut, terciptalah medan magnet yang berputar, yang di mana terjadi gaya tarik menarik dan tolak menolak akibat perbedaan polaritas tersebut. Pada umumnya pengendalian kecepatan motor listrik adalah dengan menambah besarnya tegangan sumber.

Namun dalam pengendalian dengan penambahan besar tegangan sumber dinilai kurang efisien, karena apabila semakin besar beban akan mempengaruhi kecepatan motor, dengan begitu perlu adanya penambahan pada sumber tegangan agar kecepatan bertambah apabila beban bertambah [6]. Untuk menanggulangi masalah tersebut, dapat digunakan inverter dan teknik penyaklaran PWM yang dihasilkan dari mikrokontroler.

Sebelumnya terdapat penelitian mengenai pengendalian kecepatan motor *brushless* DC menggunakan teknik PWM dengan mikrokontroler jenis ATMEGA 16, yaitu mengatur besarnya tegangan berdasarkan perubahan *duty cycle* pada PWM. Dengan penambahan *duty cycle* tersebut dihasilkan kecepatan motor semakin cepat seiring penambahan besarnya *duty cycle* [7]. Dalam penelitian ini menggunakan sensor hall untuk mendeteksi posisi rotor dan menggunakan tachometer dalam pengukuran kecepatan motor.

Penelitian mengenai pengendalian kecepatan motor *brushless direct current* (BLDC) dapat dilakukan mengatur kecepatan menggunakan mikrokontroler dengan teknik PWM, namun pendeteksian rotor dengan memanfaatkan tegangan balik yang dihasilkan dari belitan motor ketika motor sedang berputar (*Back – EMF*) [8]. Tujuan penelitian ini adalah untuk menanggulangi kelemahan pada kendaraan listrik yang menggunakan sensor hall pada motor BLDC,

yaitu apabila terjadi kerusakan pada sensor hall, dilakukan dengan mengantinya dan membongkar motor BLDC, oleh sebab itu digunakannya *Back – EMF* untuk menanggulangi masalah tersebut.

Pada penelitian ini akan membuat rancang bangun kendali kecepatan motor *brushless* dc menggunakan teknik modulasi PWM dengan frekuensi *switching* yang tinggi menggunakan mikrokontroler Arduino Mega 2560. Penelitian ini adalah mengendalikan kecepatan motor *brushless* dc yang stabil dengan respon yang tinggi dengan mengatur besarnya frekuensi sumber menggunakan inverter. Pengendalian ini akan mengakibatkan perubahan kecepatan pada motor seiring perubahan pada frekuensi sumber. Pengendalian kecepatan motor akan dilakukan dua pengujian, yaitu pengujian tanpa beban dan berbeban, dan berdasarkan dua pengujian tersebut akan dihasilkan kecepatan, daya, dan torsi dari setiap perubahan pada frekuensi sumber. Pengendalian ini akan menggunakan metode *Back – Electromotive Force (EMF)* sebagai pendeteksi posisi rotor sebagai *feedback* ke Arduino Mega.

II. METODE PENELITIAN

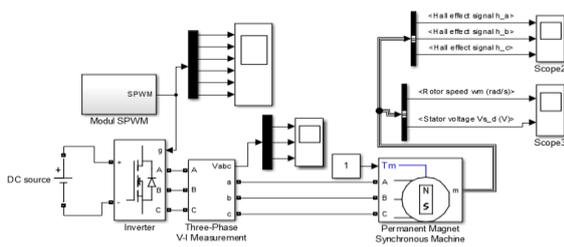
A. Perancangan Hardware

Tahap awal pada penelitian ini adalah membuat perancangan *hardware* yang akan diimplementasikan dalam sebuah rancang bangun kendali motor BLDC menggunakan Arduino Mega 2560. Sebelum melakukan perancangan,, dilakukan terlebih dahulu pemodelan pada *software* MATLAB simulink untuk melakukan pemodelan komutasi. Hasil komutasi pemodelan pada MATLAB akan menjadi referensi dalam pembuatan program pada *software* Arduino IDE. Untuk dapat memutar motor BLDC diperlukan pola komutasi atau skenario pada sudut penyalaan MOSFET secara bergantian, dengan hanya 2 MOSFET yang aktif dari 6 MOSFET, yang artinya terdapat 2 MOSFET yang akan aktif dalam setiap perubahan komutasi pada sudut penyalaan. Pola komutasi akan ditampilkan melalui tabel 1.

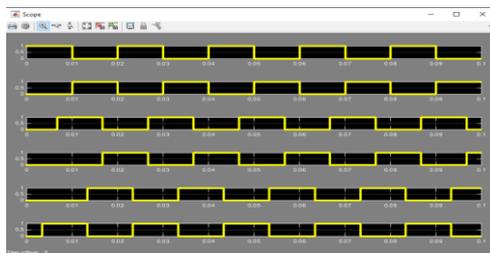
Tabel 1. Tabel sudut penyalan mosfet

Posisi rotor $deg(\theta)$	Komutasi	Perubahan Fasa		
		R	S	T
0° – 60°	S1 – S6	+	Off	-
60° – 120°	S1 – S4	+	-	Off
120° – 180°	S5 – S4	Off	-	+
180° – 240°	S5 – S2	-	Off	+
240° – 300°	S3 – S2	-	+	Off
300° – 360°	S3 – S6	Off	+	-

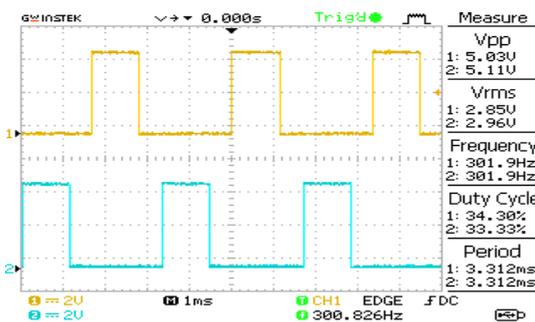
Berdasarkan tabel 1, pola komutasi pada MOSFET dapat diimplementasikan pada pemodelan MATLAB simulink seperti yang dapat dilihat pada gambar 1, sedangkan untuk pola komutasi yang dihasilkan dari arduino Mega 2560 dapat dilihat pada gambar 2.



Gbr 1a. Simulink Matlab



Gbr 1b. Pemodelan Pola Komutasi



Gbr. 2 Pola Komutasi Pada Arduino

B. Pembuatan Frekuensi Switching

Pada penelitian ini menggunakan teknik modulasi PWM dengan frekuensi tinggi, yaitu besarnya kecepatan yang dihasilkan berdasarkan pada besarnya frekuensi switching. Untuk penelitian ini, frekuensi switching yang berhasil dibangkitkan sebesar 20 KHz, dan besarnya frekuensi sumber yang dihasilkan dari frekuensi switching sebesar

300 Hz. Pembuatan frekuensi switching sendiri memanfaatkan besarnya frekuensi clock dari mikrokontroler ATMEGA 2560, dengan frekuensi clock sebesar 16 MHz.

Untuk dapat menghasilkan frekuensi switching sebesar 20 KHz, langkah selanjutnya adalah dengan membagi besarnya frekuensi clock menggunakan teknik register dan prescaler dari ATMEGA 2560 [9]. Prinsip kerja timer yaitu dengan cara membagi frekuensi (prescaler) pada clock ATMEGA 2560 yang terdapat pada mikrokontroler sesuai dengan frekuensi yang diinginkan, yaitu dengan menggunakan function timer yang ada pada ATMEGA 2560, untuk jumlah timer dari ATMEGA 2560 memiliki 5 timer. Agar dapat membagi frekuensi clock pada mikrokontroler perlu memperhatikan timer yang akan digunakan dan besarnya prescaler yang akan digunakan. Teknik pembagian frekuensi clock pada ATMEGA 2560 dapat dilihat pada tabel 2 dan tabel 3.

Tabel 2. Dekripsi Bit Mode Penghasil Sinyal

Mode	WGMn3	WGMn2 (CTCn)	WGMn1 (PWMn1)	WGMn0 (PWMn0)	Timer/Counter Mode of Operation	TOP	Update of OCRnX at	TOVn Flag Set on
0	0	0	0	0	Normal	0xFFFF	Immediate	MAX
1	0	0	0	1	PWM, Phase Correct, 8-bit	0x00FF	TOP	BOTTOM
2	0	0	1	0	PWM, Phase Correct, 9-bit	0x01FF	TOP	BOTTOM
3	0	0	1	1	PWM, Phase Correct, 10-bit	0x03FF	TOP	BOTTOM
4	0	1	0	0	CTC	OCRnA	Immediate	MAX
5	0	1	0	1	Fast PWM, 8-bit	0x00FF	BOTTOM	TOP
6	0	1	1	0	Fast PWM, 9-bit	0x01FF	BOTTOM	TOP
7	0	1	1	1	Fast PWM, 10-bit	0x03FF	BOTTOM	TOP
8	1	0	0	0	PWM, Phase and Frequency Correct	ICRn	BOTTOM	BOTTOM
9	1	0	0	1	PWM, Phase and Frequency Correct	OCRnA	BOTTOM	BOTTOM
10	1	0	1	0	PWM, Phase Correct	ICRn	TOP	BOTTOM
11	1	0	1	1	PWM, Phase Correct	OCRnA	TOP	BOTTOM
12	1	1	0	0	CTC	ICRn	Immediate	MAX
13	1	1	0	1	(Reserved)	-	-	-
14	1	1	1	0	Fast PWM	ICRn	BOTTOM	TOP
15	1	1	1	1	Fast PWM	OCRnA	BOTTOM	TOP

C. Judul dan Penulis

Judul harus dalam Reguler 16 pt font. Nama pengarang harus dalam Reguler 12 pt font. Afiliasi penulis harus dalam Reguler 11 pt. Alamat email harus di 10 pt font Courier Regular.

Tabel 3. Tabel Pembagian Pada Teknik Prescaler

CS02	CS01	CS00	Description
0	0	0	No clock source (Timer/Counter stopped)
0	0	1	clk _{ICU} (No prescaling)
0	1	0	clk _{ICU} /8 (From prescaler)
0	1	1	clk _{ICU} /64 (From prescaler)
1	0	0	clk _{ICU} /256 (From prescaler)
1	0	1	clk _{ICU} /1024 (From prescaler)
1	1	0	External clock source on T0 pin. Clock on falling edge
1	1	1	External clock source on T0 pin. Clock on rising edge

Tabel 2 dan tabel 3 merupakan pembagian menggunakan teknik prescaller pada frekuensi *clock* ATMEGA 2560. Tabel 2 merupakan *mode* dan jenis pembagian pada setiap *timer* yang akan digunakan pada pin PWM, dan tabel 3 merupakan besarnya pembagi yang akan digunakan pada teknik *prescaller* berdasarkan besarnya jumlah bit. Dengan referensi dari *datasheet* pada tabel 2 dan tabel 3, dapat dilakukan perhitungan untuk membagi frekuensi *clock* (16MHz) dengan besarnya *prescaller* yang akan digunakan untuk membagi frekuensi yang dikehendaki, perhitungan dapat dilihat dari persamaan (1), dan bentuk frekuensi yang dihasilkan dari arduino Mega 2560 dapat dilihat pada gambar 3.

$$f_{oCnxPCPWM} = \frac{f_{clk_I/O}}{2 \cdot N \cdot TOP} \quad (1)$$

Di mana :

FoCnx = Frekuensi yang dikehendaki
 Fclk_I/O = Frekuensi *clock* (16 MHz)
 N = *Prescaller* (1,8,64,256, 1024)
 TOP = Mode Keluaran Frekuensi PWM

Dari persamaan tersebut dapat dilakukan perhitungan berdasarkan parameter yang telah ditentukan.

$$20.000 = \frac{16MHz}{2 \cdot 1 \cdot 20.000}$$

$$ICR = 400.$$

Dari perhitungan tersebut diperoleh nilai ICR sebesar 400. Nilai 400 ini akan digunakan pada arduino untuk membuat program pembangkitan frekuensi switching yang dihasilkan sebesar 20 KHz. Program dari hasil perhitungan akan digunakan sebagai pembuatan program dan menampilkan hasil keluaran arduino yang dapat dilihat pada gambar 3 dan gambar 4.

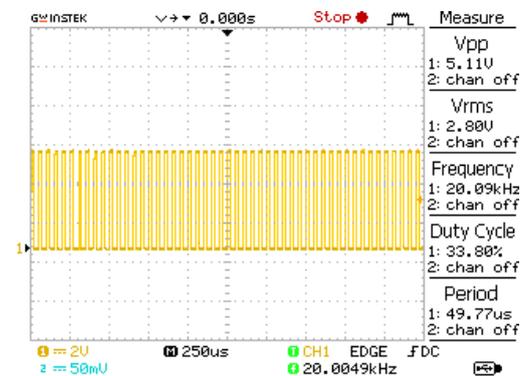
Dengan besarnya frekuensi switching sebesar 20 KHz yang dihasilkan pada arduino, maka besarnya frekuensi sumber yang dihasilkan berdasarkan dari kedua singgungan sinyal tersebut, dapat mencapai 300 Hz.

Dengan begitu kecepatan yang dihasilkan akan berbanding lurus berdasarkan frekuensi switching yang dibangkitkan.

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600);

  TCCR1A = _BV(COM1A1) | _BV(COM1B1);
  TCCR1B = _BV(WGM13) | _BV(CS10);
  ICR1 = 400 ; // 10 bit resolution
  OCR1A = 0; // vary this value between 0 and 400 for 10-bit
  OCR1B = 0; // vary this value between 0 and 400 for 10-bit
}
```

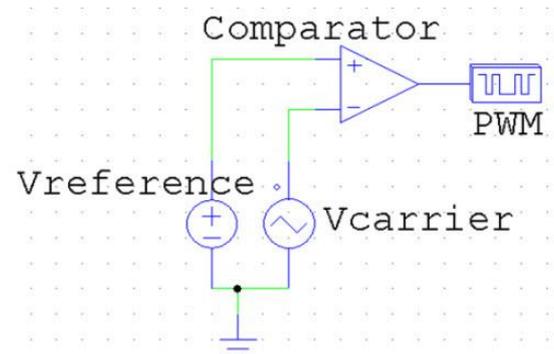
Gbr.3 Program Pada Arduino



Gbr.4 Frekuensi Switching

D. Modulasi Lebar Pulsa

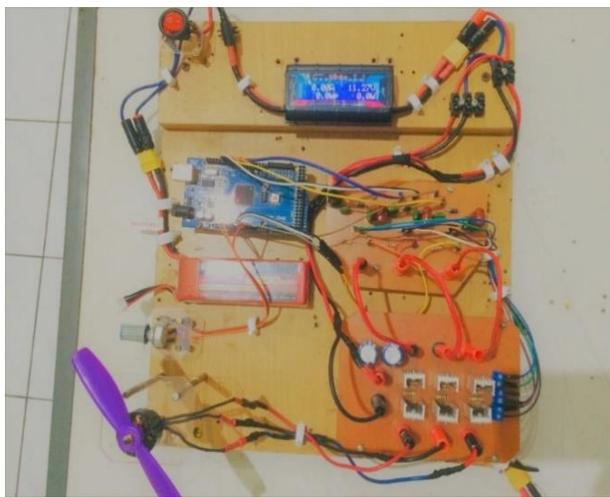
Seperti pada pengendalian motor listrik pada umumnya, pengendalian ini menggunakan teknik modulasi lebar pulsa atau PWM (*Pulse width Modulation*). Teknik modulasi ini mengatur lebar pulsa *on* dan lebar pulsa *off*, sinyal yang dihasilkan berbentuk gelombang kotak, yang di mana sinyal kotak ini diperoleh dari hasil perbandingan sinyal referensi dan sinyal *carrier*. Pembentukan sinyal PWM di sini menggunakan rangkaian komparator yang ada pada arduino Atmega 2560 sebagai pembangkit PWM.



Gbr.5 Pembentukan PWM dengan komparator

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah melakukan pengujian pada rancang bangun dan melakukan dua pengujian tanpa beban dan berbeban, diperoleh data hasil berupa besarnya kecepatan (rpm), daya (watt), torsi (Nm). Data hasil yang diperoleh berdasarkan perubahan pada frekuensi sumber dapat dilihat pada tabel 4 dan tabel 5, dan untuk bentuk dari rancang bangun pada penelitian dapat dilihat pada gambar 5. Data hasil pengujian akan ditampilkan dalam bentuk tabel, grafik, dan perhitungan.



Gbr.6 Rancang Bangun Penelitian

Tabel 4. Data hasil pengujian tanpa beban

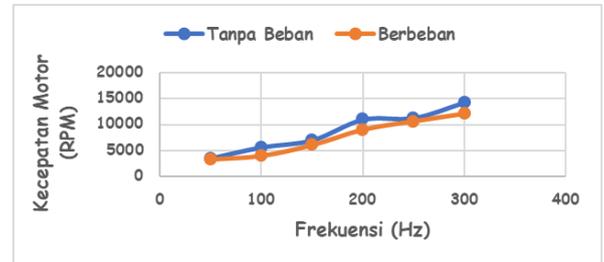
No	Tanpa Beban				
	Tegangan (V)	Arus (I)	Daya (watt)	Kecepatan (RPM)	Torsi (Nm)
1	10,86	4,02	43,6	3446	0,12
2	10,88	4,11	44,7	5608	0,078
3	10,96	5,55	60,96	6975	0,083
4	11,12	5,8	64,4	10.998	0,056
5	11,2	6,21	69,5	11.291	0,058
6	11,19	6,37	71,2	14.328	0,047

Tabel 5. Data hasil pengujian menggunakan beban.

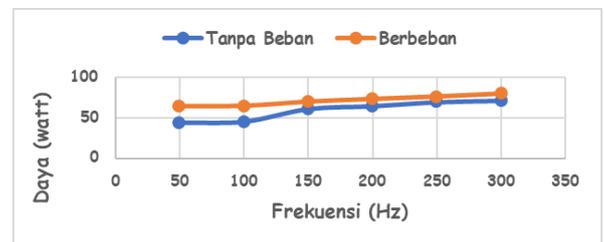
No	Berbeban				
	Tegangan (V)	Arus (I)	Daya (watt)	Kecepatan (RPM)	Torsi (Nm)
1	11,04	5,69	62,8	3352	0,18
2	11,04	5,84	64,4	4035	0,152
3	11,06	6,29	69,5	6091	0,108
4	11,1	6,55	72,7	9.021	0,076
5	11,26	6,73	75,7	10.608	0,068
6	11,21	7,08	79,3	12.060	0,062

Data hasil yang didapatkan dari 2 pengujian tanpa beban dan berbeban menunjukkan

besarnya frekuensi sumber dapat mempengaruhi besarnya daya, kecepatan, dan torsi yang dihasilkan. Penjelasan pada penelitian akan ditampilkan dalam bentuk grafik, pada gambar 7, gambar 8, dan gambar 9.

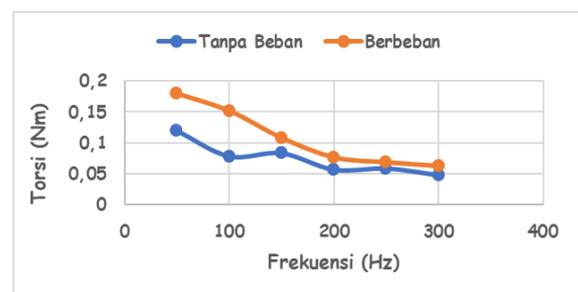


Gbr.7 Perbandingan besar frekuensi dengan kecepatan



Gbr.8 Perbandingan besar frekuensi dengan daya

Data hasil grafik yang ditunjukkan pada gambar 7 dan 8 merupakan data hasil pengujian pada keadaan tanpa beban dan menggunakan beban. Dengan data hasil yang diperoleh pada pengujian tersebut, besarnya kecepatan dan daya yang dihasilkan akan berbanding lurus dengan frekuensi sumber, di mana kecepatan akan semakin meningkat dan daya yang dihasilkan akan semakin besar seiring bertambahnya frekuensi sumber.



Gbr. 9 Perbandingan torsi motor dengan frekuensi

Setelah melakukan pengujian, dapat dianalisis bahwa data hasil pada tabel 4 dan tabel 5 berdasarkan perubahan frekuensi sumber. Untuk pengujian tanpa beban, besarnya arus yang dihasilkan motor semakin bertambah seiring kecepatan yang dihasilkan.

Untuk pengujian menggunakan beban, besarnya arus yang dihasilkan juga bertambah besar seiring kecepatan yang dihasilkan. Namun perbedaan pada kedua pengujian ini adalah, besarnya arus yang dihasilkan ketika menggunakan beban lebih besar dibandingkan pengujian tanpa beban, meskipun menggunakan frekuensi yang sama. Berdasarkan kedua pengujian tersebut, terjadi perbedaan kecepatan, daya dan torsi yang dihasilkan pada motor, hal ini disebabkan terjadinya efek pembebanan pada kedua pengujian ini. Terjadinya perubahan tersebut adalah dipengaruhi pada kecepatan yang dihasilkan dan besarnya daya yang dihasilkan sehingga besarnya torsi akan semakin menurun seiring meningkatnya daya dan kecepatan yang dihasilkan. Perubahan ini disebabkan karena arus jangkar dan arus medan magnet yang mengalami perubahan seiring kedua pengujian tersebut. Untuk pengujian tanpa beban, besarnya arus medan dan arus jangkar yang dihasilkan kecil, karena tidak adanya tekanan pada poros motor, sehingga kecepatan yang dihasilkan besar dan torsi yang dihasilkan akan menurun. Apabila pengujian menggunakan beban, kecepatan yang dihasilkan akan menurun apabila dibandingkan dengan pengujian tanpa beban, karena terdapat tekanan pada poros rotor, menyebabkan meningkatnya arus jangkar dan arus medan yang dihasilkan, sehingga besarnya torsi akan semakin besar ketika kecepatan motor menurun.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan data hasil yang diperoleh dari pengujian, dapat disimpulkan bahwa kecepatan yang dihasilkan dari pengujian tanpa beban dan pengujian berbeban adalah berbanding lurus seiring bertambahnya frekuensi. Dengan bertambahnya kecepatan yang dihasilkan, maka besarnya daya yang dihasilkan akan ikut bertambah besar, disebabkan motor membutuhkan arus yang besar seiring bertambahnya kecepatan.

Untuk pengujian tanpa beban dan berbeban, besarnya torsi yang dihasilkan

berbanding terbalik dengan kecepatan yang dihasilkan, yaitu besarnya torsi yang dihasilkan akan cenderung menurun seiring bertambahnya kecepatan.

REFERENSI

- [1] C.R.Harahap, R.Saito, H.Yamada and T. Hanamoto, "Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Using FPGA for High Frequency SiC MOSFET Inverter", *Journal of Engineering Science Technology*, pp.11-20., Taylor University, Malaysia, 2014.
- [2] Charles Ronald Harahap, Tsuyoshi Hanamoto., *FRIT based PI Tuning for Speed Control of PMSM Using FPGA for High Frequency SiC MOSFET Inverter*, IEE Xplore., Nov. 2015.
- [3] Charles Ronald Harahap, and Tsuyoshi Hanamoto "Fictitious Reference Iterative Tuning-Based Two-Degrees-of-Freedom Method for Permanent Magnet Synchronous Motor Speed Control Using FPGA for High-Frequency SiC MOSFET Inverter", *Applied Sciences*, vol. 6, Nov. 2016.
- [4] A. Muhammad, M. A. Abidin, and M. Z. Khan., "Implementation of a Three Phase for BLDC Motor Drive," *IEEE Xplore*, Dec.2016.
- [5] C. L. Xia, "Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls," John Willey & Sons Singapore, Pte. Ltd, 2012.
- [6] M.H.Rashid, "Power Electronics-Circuit, Devices and Applications", Prentice Hall International, Third Edition, 2004.
- [7] A.Dharmawan, "Pengendalian Motor Brushless DC Dengan Metode PWM Sinusoidal Menggunakan ATmega 16," Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2010.
- [8] Ganatama, G., "Kendali Kecepatan Motor Brushless Direct Current Motor Menggunakan Back - EMF Zero Crossing dengan Metode Six Step Commutation," Jember: Fakultas Teknik Universitas Jember, 2014.
- [9] H. F. Prasetyo, S. Rohman, & M. R. A. R. Santabudi, "Implementation of model predictive control using Algorithm - 3 on Arduino Mega 2560 for speed control of BLDC motor," (Vol. 10.1109/ICSITech.2017.8257192). Bandung: International Conference on Science in Information Tegnology (ICSITech), 2017.