

Soft Starting dengan Redaman Arus Starting Pada Motor BLDC

Ony Asrarul Qudsi^{1*}, Eka Prasetyono², Indra Ferdiansyah³, Syechu Dwitya Nugraha⁴, Lexy Ardiansyah⁵, Era Purwanto⁶

^{1*,2,3,4,5,6} *Politeknik Elektronika Negeri Surabaya*

**ony@pens.ac.id*

Abstract

This journal presents the detailed design and implementation of acceleration control techniques for BLDC motors for soft starting with reducing current. In general case, the increase current is very high when the motor accelerates, even more so in the starting condition. This can lead to inefficient use of energy. This research proposes a BLDC motor acceleration control design using the six-step PWM method which will control the three-phase inverter. Hall effect sensors are used as input signals for the microcontroller and are used to adjust the PWM output signal for the switching process on the mosfet. In this study, the STM32F407 microcontroller was used. The test has been carried out in two conditions, namely without current limitation and with current limitation with a set point of 250 rpm. The results show that in conditions without current limitation, the acceleration time is fast enough with an average starting current of 44A, whereas when in conditions with a current limitation of 22A, the acceleration time is slower but the average starting current is 22A.

Keywords : soft starting , BLDC , six-step

Abstrak

Jurnal ini menyajikan desain rinci dan implementasi teknik pengaturan akselerasi pada motor BLDC untuk *soft starting* dengan redaman arus. Pada umumnya, arus sangat tinggi saat motor melakukan akselerasi terlebih lagi pada kondisi pengawalan (*starting*). Hal ini dapat menyebabkan penggunaan energi menjadi tidak efisien. Pada penelitian diusulkan sebuah desain pengaturan akselerasi motor BLDC dengan metode *six-step* PWM yang akan mengendalikan inverter tiga fasa. Sensor *hall effect* digunakan sebagai sinyal masukan untuk mikrokontroler dan digunakan untuk mengatur sinyal luaran PWM untuk proses *switching*/pensaklaran pada mosfet. Pada penelitian ini digunakan mikrokontroler STM32F407. Pengujian telah dilakukan dengan dua kondisi yaitu tanpa pembatasan arus dan dengan pembatasan arus dengan *set point* 250 rpm. Hasil menunjukkan pada kondisi tanpa pembatasan arus, waktu akselerasi cukup cepat dengan arus *starting* 44A, sedangkan ketika pada kondisi dengan pembatasan arus sebesar 22A, waktu akselerasi lebih lambat 2 detik namun rata-rata arus *starting* 22A.

Kata kunci : soft starting , BLDC , six-step

1. Pendahuluan

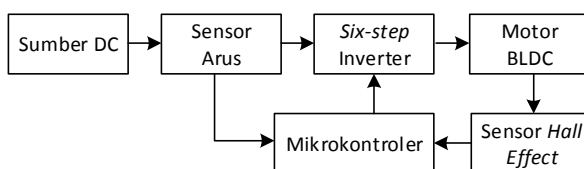
Penggunaan motor BLDC (Brushless DC) semakin meningkat pada beberapa tahun terakhir [4], [7]. Motor BLDC banyak digunakan di industri, penggerak kendaraan

listrik, dan lain sebagainya. Hal ini karena motor jenis ini memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan motor lain. Selain memiliki torsi yang cukup besar, motor BLDC memiliki performa yang baik, kecepatan

tinggi, responsif, handal dan lebih efisien karena motor ini memiliki teknologi berupa motor tanpa menggunakan sikat yang membuat rugi gesekan pada sikat dapat dihilangkan [1], [2], [5], [6].

Masalah umum yang sering terjadi pada penggunaan dan pengemudian motor ini adalah adanya arus *starting* yang sangat tinggi saat proses akselerasi kecepatan motor, sehingga menyebabkan efisiensi pada motor berkurang. Pada dasarnya, teknik *starting*/pengawalan yang digunakan adalah dengan mendeteksi posisi kumparan motor kemudian menggunakan sensor *hall effect* [3]. Cara ini cukup efektif untuk mendapatkan torsi yang besar pada saat *starting* [8], [9], [10], [11]. Namun, lonjakan arus yang cukup besar pada saat proses *starting* menyebabkan konsumsi daya pada motor menjadi besar. Selain itu, lonjakan arus yang berlebih juga akan berbahaya bagi komponen-komponen lain pada motor. Sehingga pada penelitian ini diusulkan sebuah teknik *soft starting* dengan agar lonjakan arus pada saat *starting* tidak terlalu besar.

Metode *six step* merupakan metode yang paling sering digunakan dalam pengemudian motor BLDC komersial. Hal ini karena metode ini cukup sederhana sehingga mudah diimplementasikan. Sehingga pada penelitian ini digunakan metode *six step* untuk proses *starting* motor BLDC. Akselearasi motor pada saat *starting* akan diatur agar lonjakan arus tidak terlalu besar. Selain itu, konsep pembatasan arus juga diimplematisasikan pada teknik *soft starting* yang diusulkan. Dengan demikian, lonjakan arus pada saat *starting* tidak terlalu besar dan motor dapat berputar normal sesuai dengan kecepatan yang diinginkan.



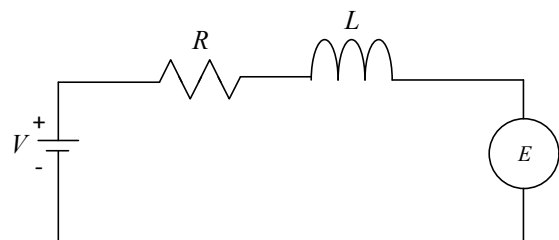
Gambar 1. Topologi Sistem

Gambar 1 menunjukkan topologi dari sistem yang diusulkan. Sumber DC dari baterai 48 Volt diubah menjadi tegangan AC menggunakan inverter tiga fasa. Hasil keluaran dari inverter tiga fasa digunakan sebagai catu daya motor BLDC. Rangkaian inverter berisi 6 buah mosfet dan dariver mosfet. Sinyal keluaran hall sensor digunakan sebagai masukan untuk mikrokontroler. Sistem yang diusulkan memiliki data *logger* untuk merekam data pada saat pengujian sehingga mempermudah proses analisa dan evaluasi pada performa motor BLDC.

2. Deskripsi Sistem

2.1. Pemodelan Motor BLDC

Secara umum motor BLDC terdiri dari dua bagian, yakni, rotor, bagian yang bergerak, yang terbuat dari permanen magnet dan stator, bagian yang tidak bergerak, yang terbuat dari kumparan tiga fasa. Motor BLDC menggunakan sumber DC sebagai sumber energy utama yang kemudian diubah menjadi tegangan AC dengan menggunakan inverter tiga fasa. Tujuan dari pemberian tegangan AC tiga fasa pada stator BLDC adalah menciptakan medan magnet putar stator untuk menarik magnet rotor. Karena tidak adanya brush pada motor BLDC, untuk menentukan timing komutasi yang tepat pada motor ini sehingga didapatkan torsi dan kecepatan yang konstan, diperlukan tiga buah sensor *hall effect*. Sensor *hall effect* digunakan untuk medeteksi posisi rotor angulator.



Gambar 2. Rangkaian pengganti motor BLDC

Gambar 2 merupakan gambar rangkaian pengganti motor BLDC untuk setiap fasa pada kondisi *steady state*. V adalah tegangan untuk tiap fasa, R adalah resistansi kumparan untuk tiap fasa, L adalah induktansi kumparan untuk

tiap fasa, dan E adalah *back electromotive force* (BEMF) untuk tiap fasa.

$$V_a = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E_a \tag{1}$$

$$V_b = i_b R_b + L_b \frac{di_b}{dt} + E_b \tag{2}$$

$$V_c = i_c R_c + L_c \frac{di_c}{dt} + E_c \tag{3}$$

Persamaan 1, 2, dan 3 menunjukkan pemodelan matematis motor BLDC untuk tiap fasa pada kondisi *steady state*. BEMF pada motor BLDC ditulis seperti pada persamaan 4, 5, dan 6. Dengan f adalah frekuensi sedangkan ω adalah kecepatan medan putar pada masing-masing kumparan.

$$E_a = f_a(\theta) \cdot E_a \cdot \omega \tag{4}$$

$$E_b = f_b(\theta) \cdot E_b \cdot \omega \tag{5}$$

$$E_c = f_c(\theta) \cdot E_c \cdot \omega \tag{6}$$

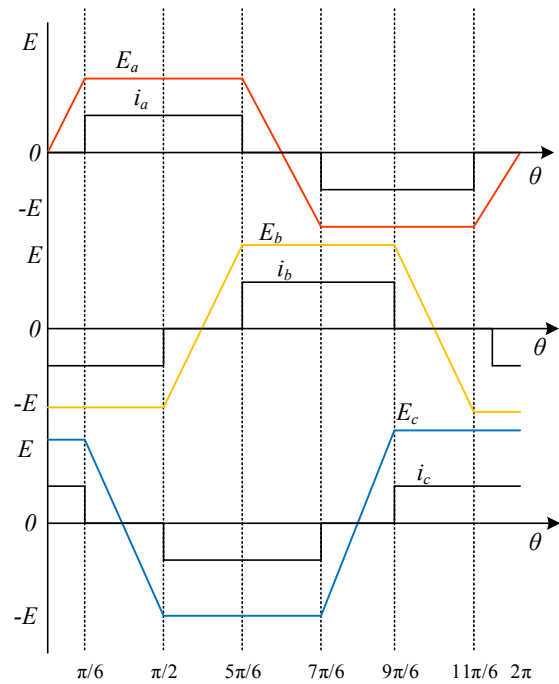
BEMF adalah fungsi posisi rotor dan direpresentasikan sebagai $f_a(\theta)$, $f_b(\theta)$, dan $f_c(\theta)$ dengan batas nilai 1 hingga -1. Dengan nilai $E = 1$, maka diperoleh:

$$E_a = \begin{bmatrix} \left(\frac{6}{\pi}\right)\theta & \left(0 < \theta < \frac{\pi}{6}\right) \\ 1 & \left(\frac{\pi}{6} < \theta < \frac{5\pi}{6}\right) \\ -\left(\frac{6}{\pi}\right)\theta + 6 & \left(\frac{5\pi}{6} < \theta < \frac{7\pi}{6}\right) \\ -1 & \left(\frac{7\pi}{6} < \theta < \frac{11\pi}{6}\right) \\ -\left(\frac{6}{\pi}\right)\theta - 12 & \left(\frac{11\pi}{6} < \theta < 2\pi\right) \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$E_b = \begin{bmatrix} -1 & \left(0 < \theta < \frac{\pi}{6}\right) \\ \left(\frac{6}{\pi}\right)\theta - 4 & \left(\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{5\pi}{6}\right) \\ 1 & \left(\frac{5\pi}{6} < \theta < \frac{9\pi}{6}\right) \\ -\left(\frac{6}{\pi}\right)\theta - 10 & \left(\frac{9\pi}{6} < \theta < \frac{11\pi}{6}\right) \\ -1 & \left(\frac{11\pi}{6} < \theta < 2\pi\right) \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$E_c = \begin{bmatrix} -1 & \left(0 < \theta < \frac{\pi}{2}\right) \\ -\left(\frac{6}{\pi}\right)\theta + 2 & \left(\frac{\pi}{6} < \theta < \frac{\pi}{2}\right) \\ -1 & \left(\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{7\pi}{6}\right) \\ \left(\frac{6}{\pi}\right)\theta - 8 & \left(\frac{7\pi}{6} < \theta < \frac{9\pi}{6}\right) \\ 1 & \left(\frac{9\pi}{6} < \theta < 2\pi\right) \end{bmatrix} \tag{9}$$

Berdasarkan persamaan BEMF pada persamaan 7, 8, dan 9 diperoleh metode *six-step* dengan perbedaan pada masing-masing BEMF adalah adalah 60° . Gambar 3 menunjukkan bentuk gelombang gelombang *trapezoid* atau gelombang *square* 3 fasa yang menggunakan 3 buah algoritma *six step* dan masing – masing berbeda 1 step (60°) antara satu algoritma dengan algoritma lainnya.

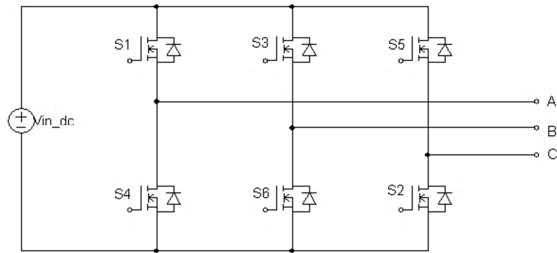


Gambar 3. Gelombang gelombang *trapezoid* pada BLDC

2.2. Six Step Inverter

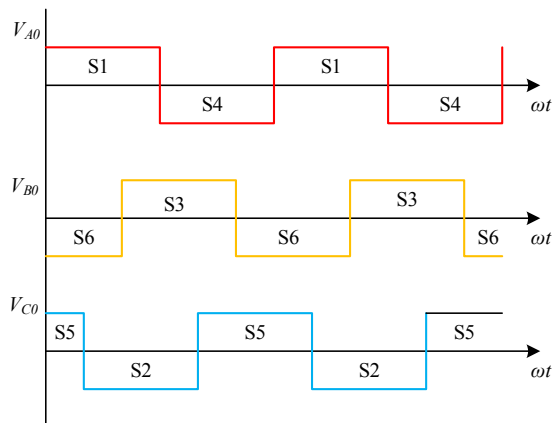
Gelombang luaran inverter sangat bergantung pada sinyal komutasi dari sensor *hall effect*. Sedangkan pengaturan komutasi dibagi menjadi 2 yaitu dengan sinyal komutasi SPWM (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*)

berbentuk gelombang sinus dan sinyal komutasi *half bridge* inverter (komutasi 180° & komutasi 120°) berbentuk gelombang segi empat (*square wave*) [12]. Pengaturan komutasi inverter tiga fasa pada penelitian ini menggunakan sinyal komutasi *half bridge* inverter (komutasi 120°). Berikut ini adalah rangkaian inverter tiga fasa pada Gambar 4.



Gambar 4. Rangkaian *six step* inverter

Gambar 4 di merupakan gambar rangkaian inverter tiga fasa yang dapat digunakan untuk menjalankan motor BLDC. Inverter tersebut menggunakan pengaturan komutasi 120° yang berarti setiap mosfet dari inverter bekerja ON selama 120° dan OFF selama 240° . Gambar 5 adalah sinyal gelombang komutasi pada inverter.



Gambar 5. Gelombang komutasi 120°

Tabel 1 merupakan tabel saklar ON/OFF pada inverter untuk motor BLDC. ON/OFF saklar inverter ditentukan dari masukan sensor *hall effect* pada mikrokontroler

Tabel 1. Pengaturan Six-Step Inverter Untuk Putaran Motor BLDC

Sensor <i>Hall Effect</i> (H_1, H_2, H_3)	Fasa	Saklar
1 0 0	A – B	S1 ; S2; S6
1 1 0	A – C	S1 ; S3 ; S2
0 1 0	B – C	S4 ; S3 ; S2
0 1 1	B – A	S4 ; S3 ; S5
0 0 1	C – A	S4 ; S6 ; S5
1 0 1	C – B	S1 ; S6 ; S5

Pada saat posisi sensor *hall effect* adalah [101] saklar yang terkonduksi adalah S1,S5,S6 sehingga V_{DC} akan mengalir melalui S1 dan S5 menuju kumparan A–B dan kembali melalu S6. Pada saat posisi sensor *hall effect* adalah [100] saklar yang terkonduksi adalah S1,S2,S6 sehingga V_{DC} akan mengalir melalui S1 menuju kumparan A–C dan kembali melalui S2 dan S6. Pada saat posisi sensor *hall effect* adalah [110] saklar yang terkonduksi adalah S1,S2,S3 sehingga V_{DC} akan mengalir melalui S1 dan S3 menuju kumparan B–C dan kembali melalui S2. Pada saat posisi sensor *hall effect* adalah [010] saklar yang terkonduksi adalah S2,S3,S4 sehingga V_{DC} akan mengalir melalui S3 menuju kumparan B–A dan kembali melalui S2 dan S4. Pada saat posisi sensor *hall effect* adalah [011] saklar yang terkonduksi adalah S3,S4,S5 sehingga V_{DC} akan mengalir melalui S3 dan S5 menuju kumparan C–A dan kembali melalui S4. Pada saat posisi sensor *hall effect* adalah [001] saklar yang terkonduksi adalah S4,S5,S6 sehingga V_{DC} akan mengalir melalui S5 menuju kumparan C–B dan kembali melalui S4 dan S6.

2.3. Metode *Soft Starting* untuk BLDC

Lonjakan arus sesaat pada proses starting motor BLDC memiliki dampak yang buruk pada performa motor dari segi efisiensi dan keandalan motor. Target dari penelitian ini adalah pengaturan waktu akselerasi dan meredam arus *starting*. Metode yang diusulkan pada penelitian ini adalah dengan merubah nilai frekuensi pada persamaan 4, 5, dan 6 sehinggakan berpengaruh pada BEMF yang dihasilkan oleh kumparan pada persamaan 7, 8, dan 9. Dengan adanya pengaturan frekuensi

yang berpengaruh pada BEMF yang dihasilkan pada tiap kumparan, maka secara langsung akan berpengaruh pula pada arus yang mengalir pada kumparan. Secara umum persamaan arus pada setiap fasa ditulis pada persamaan 10, 11, dan 12.

$$I_a = \frac{V_a - f_a(\theta) \cdot E_a \cdot \omega}{(R_a + j\omega L_a)} \tag{10}$$

$$I_b = \frac{V_b - f_b(\theta) \cdot E_b \cdot \omega}{(R_b + j\omega L_b)} \tag{11}$$

$$I_c = \frac{V_c - f_c(\theta) \cdot E_c \cdot \omega}{(R_c + j\omega L_c)} \tag{12}$$

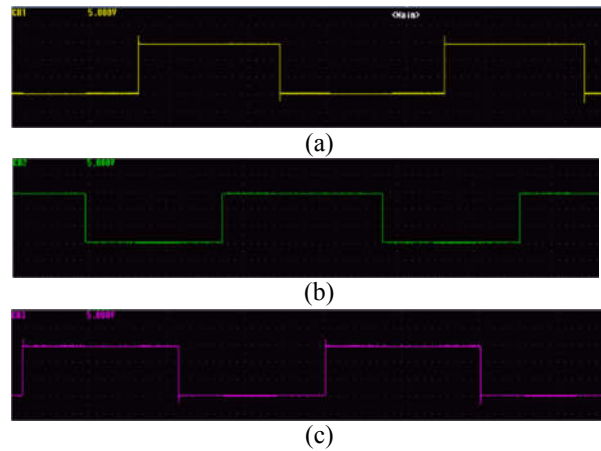
Arus akan selalu termonitoring oleh sistem kontrol. Apabila terdapat lonjakan arus yang sangat signifikan pada saat starting, maka sistem kontrol akan bekerja untuk meredam arus tersebut sehingga lonjakan arus tidak terlalu besar. Pada proses ini, driver inverter ditambahkan *dead time* pada penyulutan inverter sehingga tidak terjadi hubung singkat pada kumparan pada saat penyulutan mosfet. Dengan demikian, motor BLDC dapat melakukan proses *starting* dengan arus *starting* yang rendah.

3. Hasil Pengujian dan Analisa

3.1. Pengujian Six-step Inverter

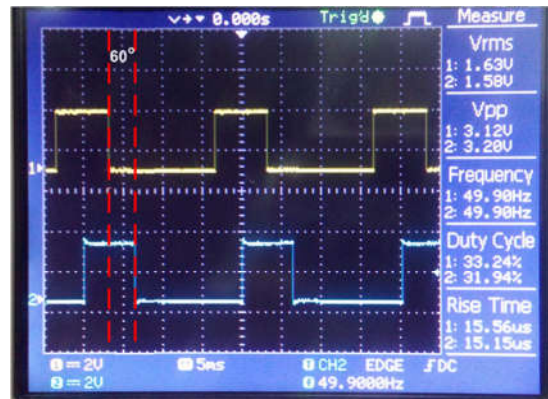
Pada motor BLDC, pensaklaran inverter ditentukan berdasarkan masukan sensor *hall effect* pada mikrokontroler. Sinyal luaran sensor *hall effect* berbentuk data digital yang bernilai 0 atau 1. Prinsip kerja sensor *hall effect* yaitu saat terdapat perubahan medan magnet, maka sensor *hall effect* akan mengeluarkan tegangan. Pada saat sensor *hall effect* mengeluarkan tegangan, ini berarti sinyal luarannya bernilai 1 atau high. Pada pengujian sensor *hall effect* dilakukan pemutaran motor untuk menimbulkan perubahan medan magnet. Dengan demikian sinyal luaran sensor *hall effect* dapat diamati. Perubahan medan magnet yang secara terus menerus pada saat motor BLDC berputar menyebabkan timbulnya pulsa yang dapat ditentukan frekuensinya. Gambar 6

menunjukkan sinyal luaran sensor *hall effect* jika diamati melalui osiloskop.



Gambar 6. (a) sinyal luaran sensor *hall effect* fasa a ; (b) sinyal luaran sensor *hall effect* fasa b ; (c) sinyal luaran sensor *hall effect* fasa c

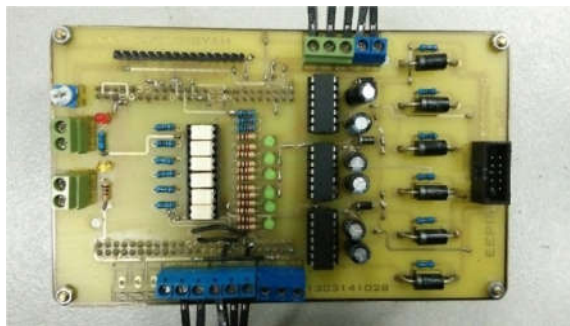
Sinyal PWM six-step dibangkitkan secara otomatis dan akan looping secara terus-menerus melalui modul mikrokontroler. Pengujian dilakukan dengan mengamati sinyal PWM pada osiloskop. Terdapat 3 PORT yang digunakan untuk membangkitkan sinyal PWM. Pengujian sinyal six-step untuk sisi high dan untuk sisi low bentuk gelombang yang ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Sinyal PWM S1/H1 (Kuning), S2/L3 (Biru)

Gambar 7 merupakan respon luaran sinyal untuk pensaklaran *high side* dan *low side*. Terdapat tiga sisi *high side* dari inverter tiga fasa yang ditunjukkan dengan simbol S1, S3 dan S5 sedangkan sisi *low side* dari inverter tiga fasa ditunjukkan dengan simbol S2, S4 dan S6. Sinyal luaran tersebut merupakan sinyal *six-step* dengan frekuensi 50

Hz. Nilai *duty cycle* yang tertera pada osiloskop untuk sinyal keluaran S1/H1 dan S2/L3 berturut-turut adalah 33.24% dan 31.94%. Hal ini menandakan pensaklaran atau komutasi yang digunakan adalah komutasi 120°, dimana S1/H1 dan S2/L3 akan ON selama 120° dan OFF selama 240°. Dari sinyal luaran pada Gambar 6 (*High side* dan *Low side*) tersebut melakukan *switching* secara berurutan dengan selisih waktu ON sebesar 60°.



Gambar 8. *Hardware* rangkaian *driver* inverter

Hardware dari rangkaian *driver* inverter tiga fasa menggunakan IC IR2110 ditunjukkan pada gambar 8. Pada gambar 8 terdapat dua buah IC, yaitu IC IR2110 dan IC TLP521. IC IR2110 merupakan *driver* dari inverter sedangkan IC TLP521 merupakan IC *optocoupler*. *Optocoupler* merupakan rangkaian pemisah yang digunakan untuk meneruskan suatu sinyal dari mikrokontroler agar bagian kontrol dan bagian yang dikontrol tidak terhubung secara langsung. Apabila terjadi kerusakan pada bagian yang dikontrol tidak menyebabkan kerusakan pada bagian kontrol maupun sebaliknya, hal ini sering disebut dengan *isolated circuit*.



Gambar 9. *Hardware* rangkaian inveter tiga fasa

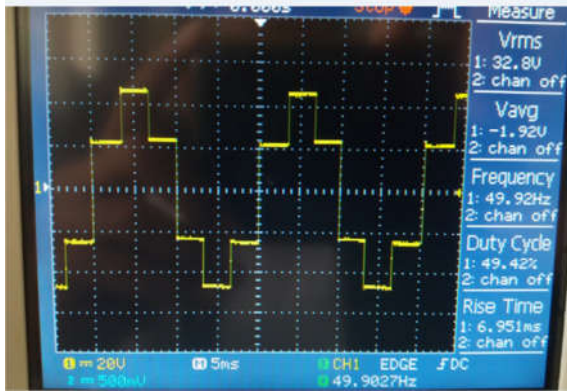
Gambar 9 merupakan *hardware* inverter tiga fasa ini terdiri dari 24 mosfet FDH210N08. Pada penelitian ini pengujian rangkaian inverter tiga fasa dilakukan dengan menggunakan beban lampu 12 x 100 Watt yang disusun bintang. Pengujian rangkaian tiga fasa dilakukan dengan memberikan tegangan masukan variable dari masukan tegangan DC, *duty cycle* dibuat konstan dan frekuensi *switching* juga dibuat konstan.

Data hasil pengujian rangkaian inverter tiga fasa dengan beban resistif 12x100 Watt ditunjukkan pada tabel 2 dan berupa nilai tegangan rms. pengujian dilakukan dengan tegangan masukan 5-50V dan frekuensi sebesar 50 Hz.

Tabel 2. Data hasil pengujian inverter tiga fasa

V _{dc} (V)	I _{dc} (A)	V _{L-rms}		
		V _{ab} (V)	V _{bc} (V)	V _{ca} (V)
5	0.02	3.34	3.3	3.32
10	0.05	6.72	6.63	6.69
15	0.05	10	10	9.99
20	0.06	13.4	13.4	13.4
25	0.07	16.4	16.5	16.2
30	0.08	19.6	19.6	19.5
35	0.08	22.8	22.9	22.7
40	0.1	26.4	26.8	26.5
45	0.1	29.4	29.6	29.4
50	0.1	32.9	33.2	32.8

Gambar 10 merupakan sinyal pembacaan osiloskop pada tegangan *line-to-line* fasa C-A saat diberi tegangan masukan 50V_{dc}.



Gambar 10. Hardware rangkaian inveter tiga fasa

Gambar 10 merupakan salah satu respon tegangan keluaran inverter tiga fasa *line-to-line* fasa C-A saat diberi beban resistif. Dari data pengujian, diperoleh nilai V_{peak} dan V_{rms} yang berbeda-beda.. Dari hasil pengukuran menggunakan osiloskop dapat dilihat bahwa gelombang tegangan line to line mempunyai 6 step karena pada pengujian inverter ini menggunakan komutasi 120° .

Data hasil pengujian rangkaian inverter tiga fasa pada motor BLDC dapat dilihat pada tabel 3. Untuk mengetahui performa inverter, data yang dilihat adalah nilai tegangan rms, arus rms, rpm motor BLDC, dan frekuensi gelombang *six-step inverter* dari pengujian. Pengujian dilakukan dengan tegangan masukan sebesar 50 Volt dan *duty cycle* diatur mulai 0-100%.

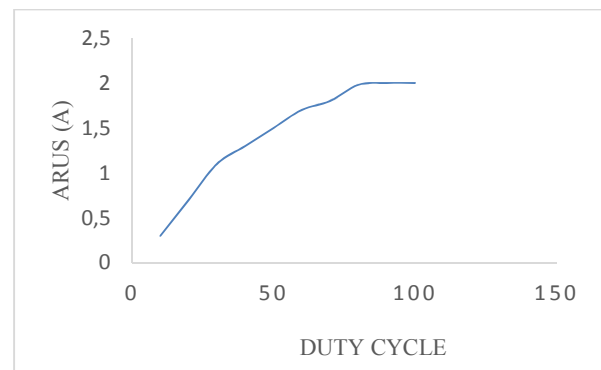
Tabel 3. Data hasil pengujian rangkaian inverter tiga fasa pada motor BLDC

Duty Cycle	Vdc (V)	Kec. (rpm)	Idc (A)
10	50	28	0,3
20	50	93	0,7
30	50	169	1,1
40	50	247	1,3
50	50	320	1,5
60	50	393	1,7
70	50	477	1,8
80	50	571	1,98
90	50	699	2
100	50	709	2

Dari data pada tabel 3, dapat dilihat respon kecepatan putar motor BLDC, arus dc masukan inverter, frekuensi tegangan luaran nverter tiga fasa, dan tegangan rms saat terjadinya perubahan *duty cycle*. Berdasarkan data pada tabel 4, dengan *duty cycle* 100%, daya yang dikonsumsi oleh *six-step* inverter adalah sebesar 100 Watt. Sedangkan daya keluaran dari inverter adalah 86,52 Watt. Sehingga dengan membandingkan antara daya yang masuk dengan daya yang keluar dari *six-step* inverter, diperoleh efisiensi pada *six-step* inverter sebesar 86,52%.

Tabel 4. Perbandingan data input-output rangkaian inverter tiga fasa pada motor BLDC

Vdc (V)	Idc (A)	Pin (Watt)	Vac (V)	Iac (A)	Pout (Watt)	η (%)
50	2	100	33,3	1,5	86,52	86,52



Gambar11. Grafik respon arus masukan terhadap *duty cycle*

Gambar 11 merupakan grafik arus masukan inverter terhadap perubahan *duty cycle*. Dari grafik pada gambar 11 dapat disimpulkan bahwa nilai arus masukan inverter berbanding lurus dengan besar perubahan *duty cycle*.

3.2. Pengujian Starting Motor BLDC Menggunakan Teknik Soft Starting

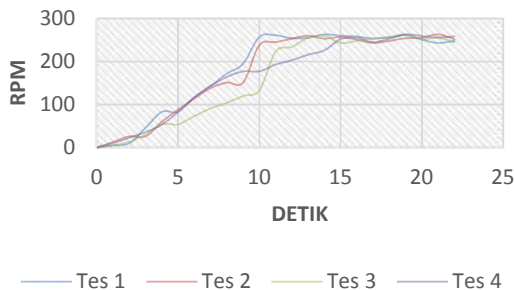
Pengujian rangkaian inverter tiga fasa motor BLDC secara *open loop* dilakukan untuk menghasilkan respon kecepatan motor dan respon arus yang dihasilkan. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan tegangan

masuk konstan pada inverter. Data pengujian ditunjukkan di dalam tabel 5.

Tabel 5. Data pengujian akselerasi rangkaian kontrol inverter tiga fasa motor BLDC (*Open Loop*)

DETIK	Kec. (rpm)			
	Tes 1	Tes 2	Tes 3	Tes 4
1	5	13	5	10
2	10	26	13	23
3	46	26	31	36
4	83	60	54	53
5	83	88	54	83
6	117	114	73	117
7	143	138	91	143
8	172	151	104	164
9	195	151	120	177
10	257	238	133	177
11	261	245	223	193
12	254	253	234	203
13	255	260	255	216
14	263	253	260	226
15	260	257	243	252
16	258	251	248	255
17	253	243	254	245
18	257	248	255	253
19	261	254	263	263
20	251	255	252	259
21	243	263	255	256
22	248	252	245	258

Berdasarkan data tabel 5 dapat dilihat hasil beberapa pengujian akselerasi motor BLDC (*open loop*) dengan kecepatan motor *set point* 250 rpm dengan waktu yang berbeda.



Gambar 12. Grafik akselerari motor BLDC *open loop*

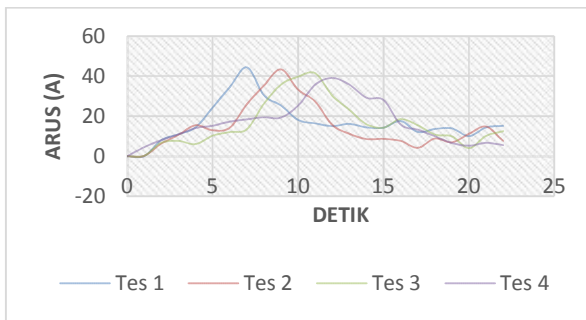
Gambar 12 merupakan grafik akselerasi motor BLDC terhadap waktu dalam kondisi beban motor BLDC yang dihubungkan dengan beban. Hasil dari 4 pengujian menghasilkan waktu akselerasi yang berbeda antara lain Tes 1 = 10 s, Tes 2 = 12 s, Tes 3 = 13s dan Tes 4 = 15s dengan kecepatan motor *set point* 250 rpm.

Hasil pembacaan arus motor BLDC. Data dari pengujian ditunjukkan di dalam Tabel 6.

Tabel 6. Data arus motor BLDC (*Open Loop*)

DETIK	Arus (A)			
	Tes 1	Tes 2	Tes 3	Tes 4
0	0	0	0	0
1	0,112	0,243	0,301	4,617
2	8,063	6,339	6,738	8,063
3	10,977	10,672	7,665	10,977
4	14,422	15,483	6,075	14,072
5	24,364	12,965	10,315	15,287
6	34,472	14,29	12,091	17,321
7	44,368	25,921	13,495	18,435
8	30,458	35,328	26,211	19,458
9	25,325	43,381	35,782	19,325
10	18,132	33,272	39,721	25,324
11	16,41	27,327	41,438	35,762
12	15,085	15,622	30,282	39,098
13	16,145	11,243	23,201	35,723
14	14,422	8,592	16,012	29,233
15	14,29	8,725	14,291	28,081
16	17,603	7,665	18,53	15,807
17	12,17	4,22	15,483	13,275
18	13,627	8,858	10,845	10,003
19	13,892	7,003	9,917	6,605
20	10,05	11,243	4,088	5,28
21	14,422	14,82	10,182	6,738
22	15,181	7,665	12,542	5,545

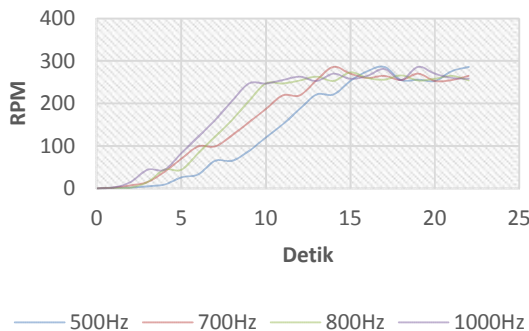
Berdasarkan data Tabel 6 dapat dilihat beberapa pengujian akselerasi motor BLDC (*open loop*) menghasilkan arus starting rata-rata sebesar 40A di waktu yang berbeda.



Gambar 13. Grafik arus motor BLDC *open loop*

Gambar 13 merupakan grafik arus motor BLDC terhadap waktu dalam kondisi beban motor BLDC yang dihubungkan dengan beban. Hasil dari 4 pengujian menghasilkan arus starting 40A diwaktu yang berbeda antara lain Tes 1 = 7s, Tes 2 = 9s, Tes 3 = 11s dan Tes 4 = 12s dengan kecepatan motor *set point* 250 rpm.

Pengujian rangkaian inverter tiga fasa juga dilakukan dengan memberikan tegangan masukan konstan pada inverter, nilai *duty cycle* 100% dari PWM dengan frekuensi *switching* 12,5 KHz, dan frekuensi *close loop* berbeda (500 Hz – 1000 Hz) dengan *set point* 250 rpm. Data hasil pengujian rangkaian inverter tiga fasa ditunjukkan pada gambar 14.



Gambar 14. Grafik Data Akselerasi Motor BLDC dengan variasi frekuensi

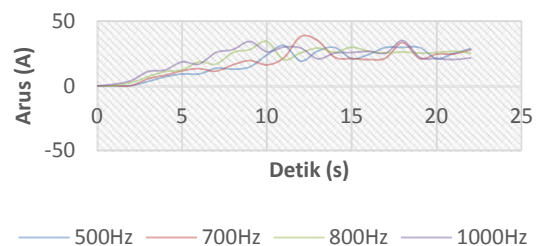
Gambar 14 merupakan grafik respon akselerasi motor BLDC yang terhubung dengan beban. Hasil pengujian sesuai dengan tabel 7 dapat disimpulkan bahwa semakin besar nilai frekuensi *close loop* maka waktu akselerasi motor BLDC mencapai *set point* semakin cepat. Dapat dilihat pada grafik frekuensi 500 Hz mencapai waktu akselerasi

15 detik, pada frekuensi 700 Hz mencapai waktu 13 detik, pada frekuensi 800 Hz mencapai waktu 12 detik sedangkan frekuensi 1000 Hz mencapai waktu akselerasi 11 detik.

Tabel 7. Data Akselerasi RPM motor BLDC dengan variasi frekuensi

DETIK	Kec. (rpm)			
	500Hz	700Hz	800Hz	1000Hz
0	0	0	0	0
1	2	2	1	2
2	2	7	2	15
3	5	15	15	44
4	9	39	44	44
5	26	70	44	83
6	33	99	83	122
7	65	99	122	161
8	65	125	161	206
9	88	156	206	247
10	120	187	247	247
11	151	219	247	255
12	187	219	254	263
13	221	255	263	253
14	221	286	253	270
15	253	270	273	258
16	276	260	260	265
17	286	265	256	281
18	255	255	266	255
19	256	270	254	286
20	253	253	258	270
21	276	255	265	260
22	286	265	254	258

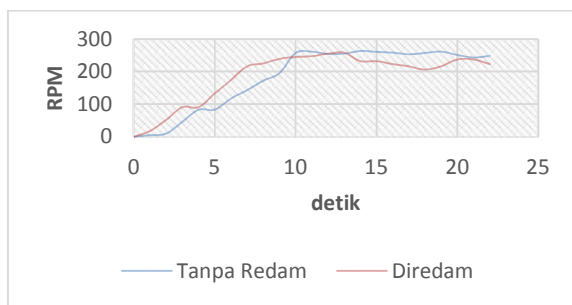
Data hasil pengujian pada motor BLDC juga mendapatkan data gambar respon arus terhadap waktu dengan frekuensi *close loop* yang berbeda. Data dari pengujian ditunjukkan gambar 15.



Gambar 15. Grafik Data Arus Motor BLDC dengan variasi frekuensi

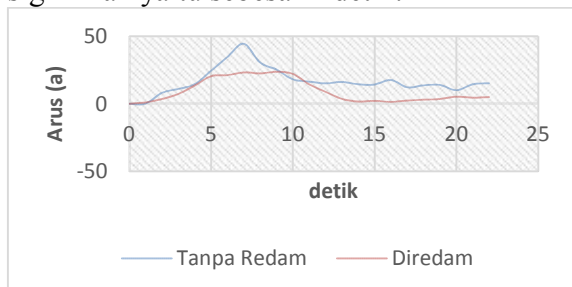
Pada Gambar 15 merupakan grafik respon arus akselerasi motor BLDC yang terhubung dengan beban terhadap perubahan *frekuensi close loop*. Hasil dari 4 pengujian menghasilkan arus starting 34A diwaktu yang berbeda antara lain 500 Hz = 11s, 700 Hz = 12s, 800 Hz = 10s dan 1000 Hz = 9s dengan kecepatan motor *set point* 250 rpm.

Pengujian rangkaian inverter tiga fasa pada motor BLDC dengan mereduksi arus starting dilakukan dengan memberikan tegangan masukan konstan pada inverter, nilai *duty cycle* 100% dari PWM dengan frekuensi *switching* 12,5 KHz, dan frekuensi *close loop* berbeda (500 Hz – 1000 Hz) dengan *set point* 250 rpm serta arus direduksi dengan *set point* 22A. Data dari pengujian ditunjukkan pada gambar 16 dan 17.



Gambar 16. Grafik perbandingan data akselerasi motor BLDC dengan redaman arus dan tanpa redaman arus

Gambar 16 merupakan grafik respon akselerasi motor BLDC yang menunjukkan bahwa Tanpa redam mencapai kecepatan 250 rpm dengan waktu 10 detik sedangkan Diredam mencapai kecepatan 250 rpm dengan waktu 12 detik. Hal ini menunjukkan perbedaan waktu akselarsi yang tidak terlalu signifikan yaitu sebesar 2 detik.



Gambar 17. Grafik perbandingan arus motor BLDC dengan redaman arus dan tanpa redaman arus

Gambar 17 merupakan grafik respon arus akselerasi motor BLDC yang menunjukkan bahwa tanpa redaman arus, maka lonjakan arus *starting* mencapai 44,368A sedangkan redaman arus, lonjakan arus *starting* mencapai 23,167A. Dengan demikian, metode yang diusulkan cukup efektif untuk meredam arus *starting* pada motor BLDC.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari pengujian yang telah dilakukan dapat dikonfirmasi bahwa metode *soft starting* untuk motor BLDC yang diusulkan dapat meredam lonjakan arus pada saat *starting*. Lonjakan arus dapat diatut sesuai dengan *set point* yang diinginkan. Dengan adanya redaman arus pada saat *strating*, ada efek yang tidak terlalu signifikan pada waktu akselarsi. Terdapat perbebaan waktu 2 detik antara menggunakan metode *soft starting* yang diusulkan dan tanpa *soft starting* untuk menuju *set poit* kecepatan motor BLDC yaitu 250 rpm.

6. Daftar Pustaka

- [1] S. A. Sadrossadat and O. Rahmani, "ANN-based method for parametric modelling and optimising efficiency, output power and material cost of BLDC motor," in *IET Electric Power Applications*, vol. 14, no. 6, pp. 951-960, 6 2020, doi: 10.1049/iet-epa.2019.0686.
- [2] Z. Li, Q. Kong, S. Cheng and J. Liu, "Torque ripple suppression of brushless DC motor drives using an alternating two-phase and three-phase conduction mode," in *IET Power Electronics*, vol. 13, no. 8, pp. 1622-1629, 17 6 2020, doi: 10.1049/iet-pel.2019.0960.
- [3] X. Yao, C. Ma, J. Zhao and F. De Belie, "Rapid estimation and compensation method of commutation error caused by Hall sensor installation error for BLDC motors," in *IET Electric Power Applications*, vol. 14, no. 3, pp. 337-347, 3 2020, doi: 10.1049/iet-epa.2018.5941.
- [4] M. S. Trivedi and R. K. Keshri, "Evaluation of Predictive Current Control Techniques for PM BLDC Motor in

- Stationary Plane," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 46217-46228, 2020
- [5] P. Mishra, A. Banerjee and M. Ghosh, "FPGA-Based Real-Time Implementation of Quadral-Duty Digital-PWM-Controlled Permanent Magnet BLDC Drive," in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 25, no. 3, pp. 1456-1467, June 2020, doi: 10.1109/TMECH.2020.2977859.
- [6] R. L. Valle, P. M. De Almeida, G. A. Fogli, A. A. Ferreira and P. G. Barbosa, "Simple and Effective Digital Control of a Variable-Speed Low Inductance BLDC Motor Drive," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 13240-13250, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2966437.
- [7] K. Xia, Y. Ye, J. Ni, Y. Wang and P. Xu, "Model Predictive Control Method of Torque Ripple Reduction for BLDC Motor," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 56, no. 1, pp. 1-6, Jan. 2020, Art no. 7503106, doi: 10.1109/TMAG.2019.2950953.
- [8] K. Lee, D. Kim, B. Kim and B. Kwon, "A Novel Starting Method of the Surface Permanent-Magnet BLDC Motors Without Position Sensor for Reciprocating Compressor," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, no. 1, pp. 85-92, Jan.-feb. 2008, doi: 10.1109/TIA.2007.912734.
- [9] G. H. Jang and C. I. Lee, "Dual winding method of a BLDC motor for large starting torque and high speed," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 10, pp. 3922-3924, Oct. 2005, doi: 10.1109/TMAG.2005.854967.
- [10] W. Lee and S. Sul, "A New Starting Method of BLDC Motors Without Position Sensor," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 42, no. 6, pp. 1532-1538, Nov.-dec. 2006, doi: 10.1109/TIA.2006.882668.
- [11] G. Liu, S. Chen, S. Zheng and X. Song, "Sensorless Low-Current Start-Up Strategy of 100-kW BLDC Motor With Small Inductance," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 13, no. 3, pp. 1131-1140, June 2017, doi: 10.1109/TII.2016.2607158.
- [12] O. A. Qudsi, N. A. Windarko, A. Priyadi and M. H. Purnomo, "Optimized GDPWM based on Spontaneous Evolutionary GA for reducing switching losses on inverter," 2013 International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), Yogyakarta, 2013, pp. 391-396, doi: 10.1109/ICITEED.2013.6676274.