

Peredaman *Noise* pada Deteksi BEMF Motor BLDC *Sensorless* Menggunakan Digital Filter

Sulis Wanto¹, Era Purwanto², dan Ony Asrarul Qudsi³

^{1,2,3} Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Jl. Raya ITS, Jawa Timur, Indonesia.

email: sulisw2502@gmail.com¹, era@pens.ac.id², ony@pens.ac.id³

Abstrak - *Brushless direct current motor* (BLDC) merupakan motor *synchronous* AC 3 fasa dan dapat disebut *permanent magnet synchronous motor* (PMSM) yang mempunyai tegangan *back electromotive force* (BEMF) gelombang trapezoidal. Untuk kendali motor BLDC menggunakan *field oriented control* (FOC), pada metode ini memanfaatkan arus stator pada motor BLDC dengan fluks motor dan torsi motor menggunakan kontrol PI untuk menjaga arus yang diukur tetap pada nilai referensi atau nilai *set point*. Pada motor BLDC *sensorless* menggunakan rangkaian deteksi BEMF yang difungsikan sebagai sensor tegangan untuk mendeteksi tegangan BEMF, tetapi sinyal yang dihasilkan memiliki *noise* yang cukup tinggi. Maka, sinyal tegangan *back electromotive force* (BEMF) akan diolah dan diperbaiki menggunakan digital filter *finite impulse response filter* (FIR) sehingga sinyal BEMF menjadi sinyal ideal yang akan memudahkan saat menentukan komutasi. Pada pengujian dengan menggunakan filter FIR sebelum dilakukan *filtering* gelombang tegangan BEMF memiliki frekuensi sebesar 34,76 Hz kemudian direduksi dengan menghilangkan *noise* pada gelombang menjadi 21,25 Hz di mana mendekati gelombang trapezoidal yang ideal, maka membuat sinyal tegangan BEMF dapat mempermudah dalam penentuan komutasi untuk *switching* mosfet inverter 3 fasa.

Kata Kunci - Motor BLDC, filter, BEMF, sinyal.

Abstract - A *Brushless direct current motor* (BLDC) is a 3-phase AC *synchronous* motor and can be called a *permanent magnet synchronous motor* (PMSM) which has a *back electromotive force* (BEMF) voltage in a trapezoidal wave. For BLDC motor control using *field oriented control* (FOC), this method utilizes stator current on a BLDC motor with motor flux and motor torque using PI/PID control to keep the measured current at the reference value or set point value. The *sensorless* BLDC motor uses a BEMF detection circuit that functions as a voltage sensor to detect BEMF voltage, but the resulting signal has a high enough noise. So, the *back electromotive force* (BEMF) signal will be processed and corrected using an FIR (*Finite Impulse Response Filter*) digital filter so that the BEMF signal becomes an ideal signal that will make it easier to determine commutation. On test by using an FIR filter before filtering the BEMF voltage wave has a frequency of 34.76 Hz then it is reduced by eliminating noise in the wave to 21.25 Hz which is close to the ideal trapezoidal wave, then making the BEMF voltage signal can facilitate the determination of commutation for switching 3 phase inverter MOSFET.

Keyword - BLDC motor, filter, Back EMF, signal.

I. PENDAHULUAN

Motor BLDC banyak dimanfaatkan di berbagai bidang industri dan lain sebagainya karena mempunyai performa yang sangat baik, memiliki efisiensi yang tinggi, daya densitas yang tinggi, dan biaya perawatan motor yang relatif lebih rendah karena tidak memiliki *brush* atau sikat. *Brushless direct current motor* (BLDC) merupakan motor *synchronous* AC 3 fasa dan bisa disebut juga *permanent magnet synchronous motor*. Perbedaan motor BLDC dengan motor PMSM adalah terletak pada *back electromotive force* (BEMF), pada motor BLDC memiliki BEMF berbentuk gelombang trapezoidal sedangkan pada motor PMSM memiliki BEMF berbentuk gelombang sinusoidal [1]. Untuk menjalankan sebuah motor BLDC dibutuhkan sebuah inverter 3 fasa yang berfungsi mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC 3 fasa [2], [3], [4]. Untuk

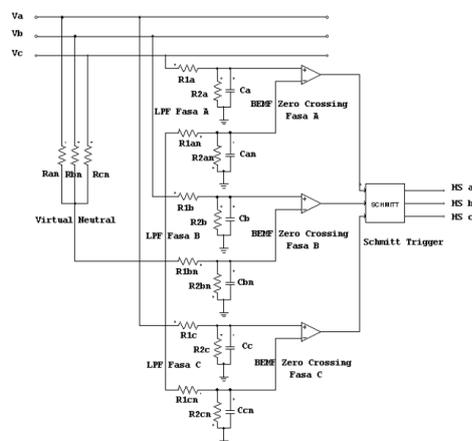
untuk mengubah tegangan dan arus rotor, sehingga diperoleh suatu torsi yang diinginkan. Perubahan torsi ini akan merubah motor sehingga bisa mendekati kecepatan referensi.

Untuk mendapatkan nilai fluks dan torsi dengan menggunakan beberapa transformasi yaitu *transformasi clark* dan *transformasi park*. Arus a,b,c tersebut diubah menjadi I_α dan I_β melalui *transformasi clark*, kemudian akan didapatkan sebuah persamaan $I_\alpha + I_\beta + I_c = 0$. Selanjutnya nilai I_α dan I_β diubah menjadi I_d dan I_q melalui *transformasi park*. Pada *transformasi park* dibutuhkan sebuah nilai θ , setelah mendapatkan nilai θ baru dapat dilakukan *transformasi park* sehingga terdapat dua arus yaitu I_d dan I_q , tetapi pengaturan hanya dilakukan pada arus jangkar (I_q) saja dikarenakan motor BLDC mempunyai magnet permanen yang tidak dapat diubah. Jika ada *error* maka akan menggunakan kontrol PI untuk mengolah *error*, $\Delta error$ kemudian dikonversi menggunakan *transformasi inverse park* dan *transformasi inverse clark* sebagai *input* kontrol dan untuk dijadikan sinyal V_a , V_b , dan V_c sebagai referensi sinyal PWM.

B. Perencanaan Deteksi BEMF

Pada pengaturan kecepatan motor BLDC tanpa menggunakan sensor *hall effect sensor* diperlukan rangkaian deteksi tegangan BEMF *zero-crossing*. Tegangan BEMF yang timbul dari fasa *floating* merupakan indikasi dari posisi rotor dan dimungkinkan dapat digunakan untuk menentukan komutasi. Pendeteksian sinyal tegangan BEMF ini memerlukan tegangan netral sebagai referensi menentukan titik *zero* dari sinyal untuk menghasilkan sinyal digital. Karena titik netral pada motor BLDC sulit dijangkau, maka bisa diperoleh dengan membuat *virtual neutral point* dengan menyatukan ketiga fasa motor. Untuk membentuk sinyal digital sebagai hasil deteksi BEMF diperlukan komparator untuk setiap tegangan fasa motor. Komparator di setiap fasa motor ini memberikan sinyal digital sesuai dengan adanya tegangan BEMF setiap motor. Hasil luaran *zero crossing* pada komparator akan dilewatkan *schmitt trigger* untuk membentuk sinyal digital yang bagus dan mengurangi efek *bouncing*. Pendeteksian tegangan BEMF ini sebelumnya melewati rangkaian filter LC terlebih dahulu.

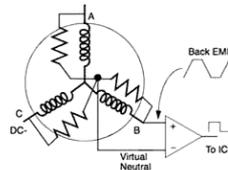
Dengan terpasangnya filter LC, maka akan membuat sinyal tegangan yang awalnya tidak beraturan menjadi lebih halus yang kemudian diolah oleh komparator yang menghasilkan sinyal *zero crossing* dengan membandingkan referensi titik *virtual neutral*. Luaran sinyal yang telah melalui beberapa rangkaian tadi inilah yang nantinya digunakan sebagai komutasi inverter yang akan diolah oleh mikrokontroler layaknya sensor *hall effect*. Maka dapat dilihat sebuah rangkaian seperti pada Gambar 2. untuk mendeteksi sinyal tegangan BEMF.



Gambar 2. Rangkaian Deteksi BEMF *Zero-Crossing*.

Proses metode *six-step commutation* menggunakan 2 fasa yang dialiri arus secara bergantian. Fasa yang tidak aktif inilah yang nantinya terdapat sinyal BEMF karena adanya sebuah permanen magnet yang terletak pada rotor BLDC. Metode deteksi BEMF didasarkan pada fakta bahwa hanya 2 fasa dari motor BLDC terhubung pada suatu waktu, sehingga fasa ketiga dapat digunakan untuk deteksi tegangan BEMF. Diasumsikan ketika fasa A dan B on dan

maka fasa C *off* atau tidak ada arus yang akan mengalir melalui fasa C. Pendeteksian sinyal BEMF ini memerlukan tegangan netral sebagai referensi untuk menentukan titik nol untuk menghasilkan bentuk sinyal.



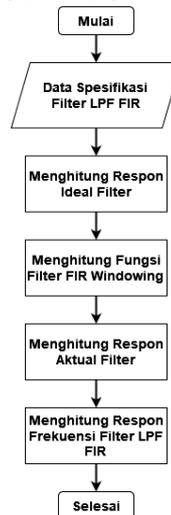
Gambar 3. Penggunaan Virtual Neutral Point [2]

Pada Gambar 3 titik netral yang sulit didapat karena posisi yang susah untuk dijangkau. Maka titik netral dibuat dengan menggabungkan ketiga fasa motor yang disebut *virtual neutral point*. Titik netral ini disusun resistor untuk membentuk sinyal sebagai hasil BEMF, dan diperlukan komparator di setiap fasa pada motor untuk membalik hasil gelombang. Pada kombinasi tiga sinyal inilah yang digunakan untuk menentukan waktu komutasi.

C. Perencanaan Filter Digital

Filter adalah rangkaian yang melewatkan suatu frekuensi tertentu yang diinginkan dan meredam frekuensi lainnya. Filter dibagi menjadi dua jenis yaitu filter analog dan filter digital. Pada Gambar 4. dijelaskan blok diagram pengolahan sinyal yang mana proses filter digital terjadi pada *digital signal processing* dengan melalui proses pengkodean. Menurut respon *impulse* nya filter digital dibagi menjadi dua, yaitu filter *infinite impulse filter* (Filter IIR) dan filter *finite impulse filter* (Filter FIR). Pada penelitian ini yang akan digunakan ialah filter FIR di mana filter ini memiliki respon impuls yang panjangnya terbatas dan tidak memiliki *pole* sehingga kestabilannya bagus.

Pada perencanaan filter digital dilakukan perhitungan sebagai bentuk pengolahan data filter digital. Berikut adalah diagram alir untuk perencanaan digital filter FIR *lowpass* dengan menggunakan metode *windowing* pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram Alir Perencanaan Filter FIR LPF [6].

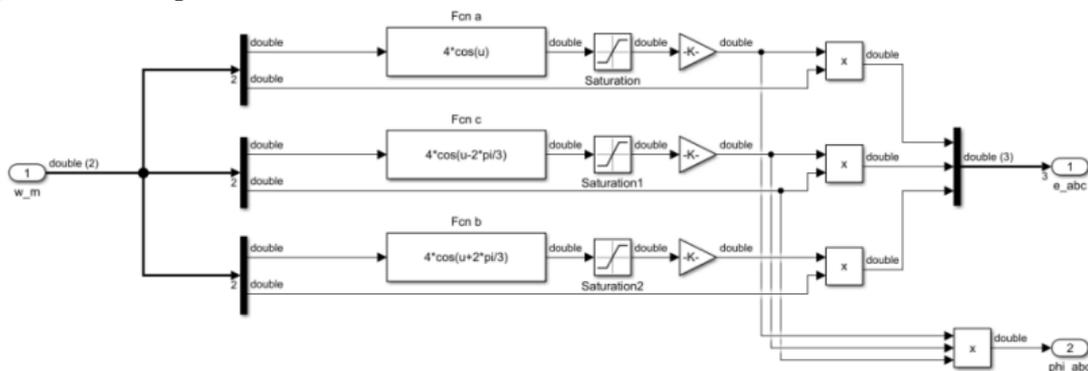
Pada perencanaan filter FIR LPF hal yang pertama dilakukan adalah mencari data-data filter yang dibutuhkan pada saat perencanaan seperti frekuensi sampling, frekuensi *cut off* dan sebagainya. Setelah didapatkan data komponennya maka dapat dimasukkan kedalam rumus persamaan untuk menghitung kondisi ideal filter yang diinginkan untuk proses filter BEMF. Kemudian dilanjutkan dengan menghitung fungsi filter FIR yang diinginkan pada proses *filtering* maka didapatkan kondisi *real response* filter yang diinginkan. Jika sudah didapatkan respon pada kondisi aktual filter pada *time domain* maka dirubah pada *frekuensi domain* untuk

Pada Gambar 6. merupakan simulasi pemodelan rangkaian closeloop dari kendali motor BLDC *sensorless* dengan menggunakan metode *field oriented control (FOC)*, di mana pada simulasi pemodelan motor BLDC menggunakan data parameter yang mendekati parameter real motor BLDC. Pada penelitian ini yang digunakan motor BLDC dengan tegangan *input* hingga 48V. Motor yang digunakan sebagai penggerak yaitu motor BLDC, sehingga diperlukan inverter 3 fasa sebagai driver motor BLDC. Pada sistem ini driver motor BLDC yang dibuat menggunakan metode *field oriented control*. Dengan menggunakan feedback dari rangkaian deteksi BEMF untuk motor BLDC, untuk mengetahui posisi rotor berada. Pengaturan tegangan pada motor dapat diatur melalui duty cycle pada inverter 3 fasa, namun pada penelitian ini menggunakan pengaturan pada duty cycle untuk mengatur frekuensi pada inverter 3 fasa dan akan diukur menggunakan tegangan BEMF motor (E_a, E_b, E_c) akan terbaca, sinyal tegangan akan difilter menggunakan filter LC sebagai *input* untuk proses digitalisasi menggunakan mikrokontroller yang kemudian akan diolah sinyal yang didapatkan dan difilter menggunakan filter FIR sebagai filter digital pada mikrokontroller. Filter ini nanti yang akan mengolah dan memperbaiki sinyal yang kemudian akan dijadikan komutasi pada motor BLDC. Hasil dari deteksi tegangan BEMF dibutuhkan pada *transformasi park* yaitu pada nilai θ . Setelah mendapatkan nilai θ dari sinyal deteksi tegangan BEMF untuk mengetahui posisi rotor, baru dapat dilakukan transformasi Park sehingga dapat mengolah data yang dibutuhkan pada sistem *field oriented control*.

TABEL 1. PENDEKATAN PARAMETER SPESIFIKASI MOTOR BLDC

Parameters	Value
Rated Power	1 kW
Rated Voltage	500 VDC
Resistance of the stator (R)	21,2 Ω
Inductance of the stator (L)	0,052 H
Viscous coefficient (D)	1 x 10 ⁻⁴ kg-ms/rad
Moment of Inertia (J)	1 x 10 ⁻³ kg-ms ² /rad
Back emf constant (K _b)	0,1433 vs/rad
Load Torque (T _L)	11 Nm
Motor Torque Constant (K _g)	0,1433 kg-m/A
No of Pole Pairs	2
Speed of the rotor (N)	3000 RPM
Rotor Magnetik Flux (ϕ)	0.11 Weber

Karena sistem simulasi pemodelan ini tidak menggunakan *hall effect sensor* untuk mengetahui posisi rotor maka digunakan rangkaian pengganti yaitu deteksi sinyal tegangan BEMF untuk mendapatkan sinyal BEMF yang berupa gelombang trapezoidal pada simulasi yang dimodelkan pada Gambar 7.

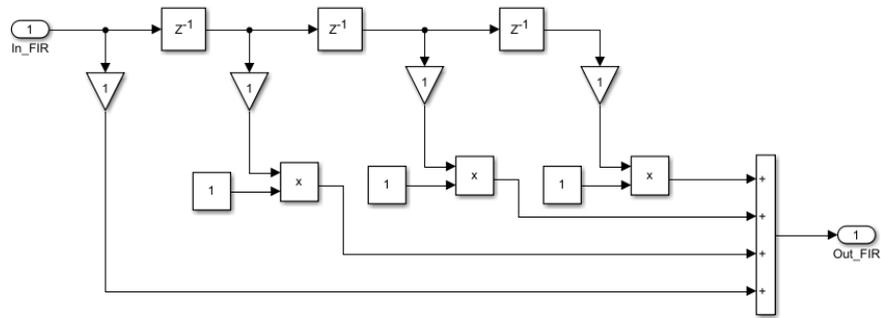


Gambar 7. Pemodelan Rangkaian Deteksi Tegangan BEMF pada Simulink MATLAB

Pada Gambar 7 adalah pemodelan rangkaian deteksi tegangan BEMF pada simulink yang akan mendeteksi dan membandingkan tegangan luaran yang didapatkan dari tegangan balik dari tiap fasa luaran pemodelan motor BLDC *sensorless* dengan membangkitkan tegangan gelombang trapezoidal menggunakan sebuah persamaan *transfer function* sehingga

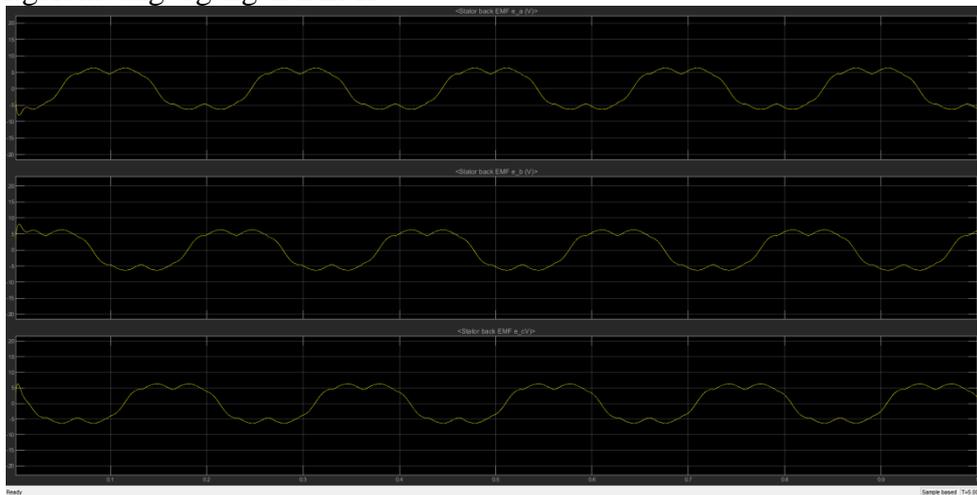
mendapatkan bentuk luaran gelombang trapezoidal BEMF yang digunakan untuk deteksi motor BLDC *sensorless* yang akan difilter dan diolah.

Setelah didapatkan gelombang trapezoidal luaran sinyal tegangan BEMF maka dilakukan proses *filtering* menggunakan *finite impulse response* filter yang juga dimodelkan di simulink MATLAB pada Gambar 8.

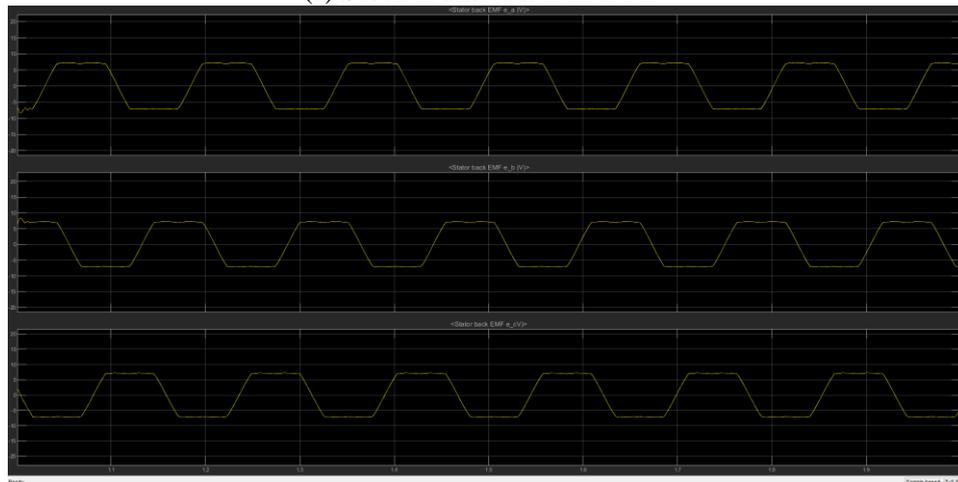


Gambar 8. Pemodelan Rangkaian *Finite Impulse Response Filter* pada Simulink MATLAB

Pada Gambar 8 merupakan pemodelan filter FIR pada simulink, pada perancangan filter tersebut dirancang dengan menggunakan *impulse* sebanyak $N = 4$ atau jumlah respon yang akan diproses sebanyak 4 buah *impulse* dengan kondisi filter FIR yang ideal. Perancangan dilakukan pada kondisi ideal dan dilakukan perhitungan seperti rumus untuk perancangan pembuatan filter FIR, maka didapatkan pemodelan seperti gambar diatas dengan kondisi filter digital ideal untuk memfilter gelombang tegangan BEMF.



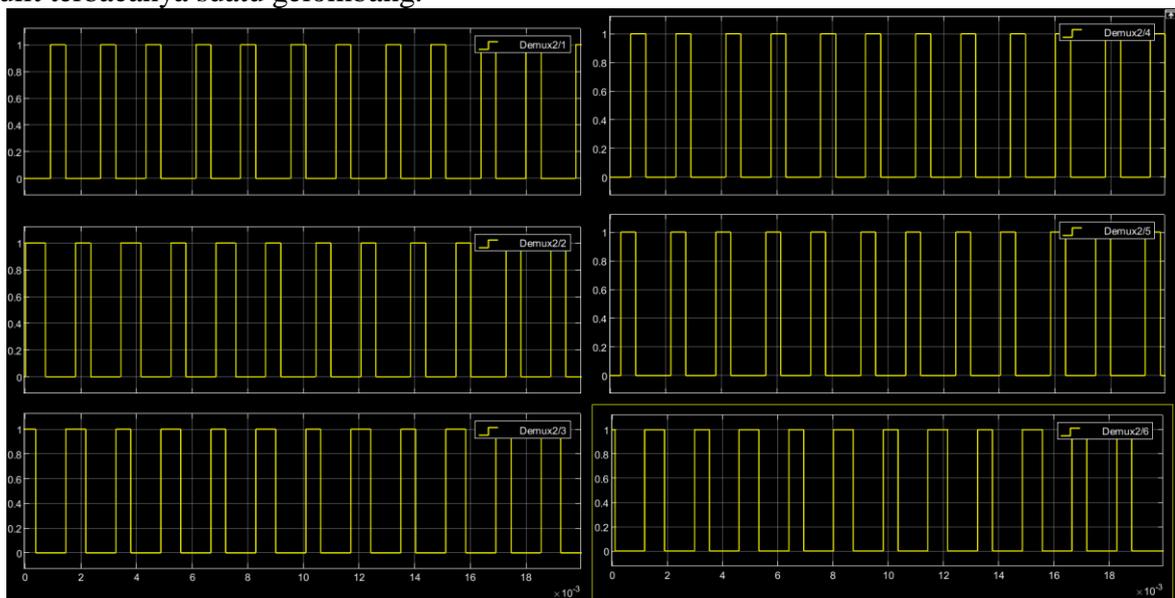
(a) Sebelum dilewatkan filter FIR.



(b) setelah dilewatkan filter FIR.

Gambar 9. Gambar Sinyal Tegangan BEMF

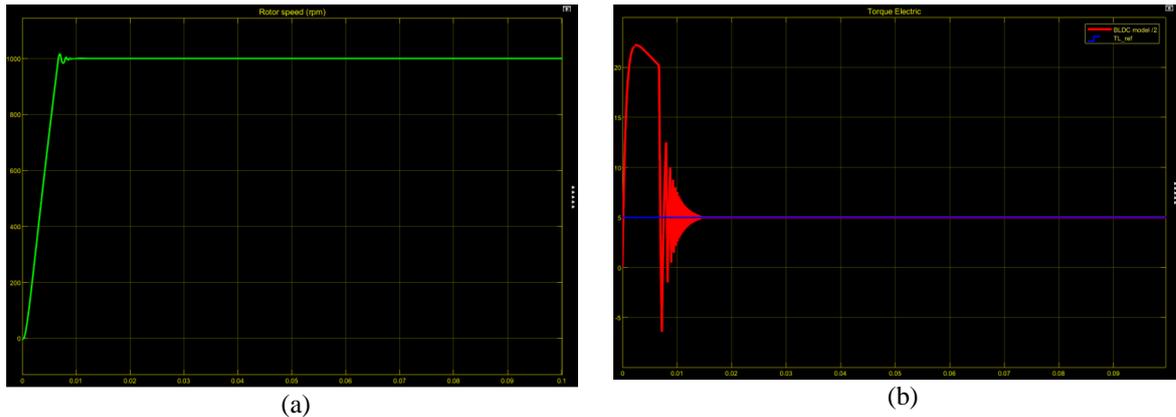
Pada Gambar 9 dapat dilihat setelah dilakukan pada simulasi pemodelan menggunakan simulink MATLAB didapatkan hasil luaran sinyal tegangan BEMF yang memiliki *noise* sangat besar, di mana *noise* yang cukup besar ini akan mempengaruhi dalam proses penentuan komutasi yang pasti akan menyebabkan kesulitan untuk mengolah sinyal tegangan BEMF. Maka setelah dilakukan *filtering* menggunakan pemodelan filter FIR terhadap sinyal tegangan BEMF akan mempermudah dalam penentuan komutasi untuk *switching* motor BLDC. Pada Gambar 9 merupakan hasil keluaran sinyal tegangan BEMF sebelum dan sesudah melewati filter FIR dapat dilihat dan dibandingkan, di mana memiliki nilai amplitudo yang sama sebesar 7,981 sedangkan pada frekuensi terhadap gelombang sebelum difilter mempunyai frekuensi yang cukup besar yaitu 34,76 Hz dan setelah dilakukan filter frekuensi tegangan BEMF menjadi 21,25 Hz. Perbedaan frekuensi yang cukup signifikan pada filter ini dapat mengurangi *noise* pada gelombang BEMF, di mana jika semakin tinggi frekuensi yang terdapat dalam sebuah gelombang tegangan akan sangat mempengaruhi gelombang tegangan ideal yang dapat menghasilkan *noise* tinggi sehingga merusak gelombang tersebut di mana akan menyebabkan sulit terbacanya suatu gelombang.



Gambar 10. Sinyal Komutasi PWM untuk *Switching* Mosfet Inverter 3 Fasa

Dalam menentukan komutasi *switching* PWM sangat diperlukan karena sangat penting dalam menjalankan motor BLDC *sensorless*, dengan adanya filter FIR sangat membantu perbaikan sinyal deteksi sebagai pengganti *hall sensor* yang masih mengandung banyak sekali *noise*. Dengan adanya filter FIR yang memperbaiki luaran sinyal deteksi BEMF yang mendekati kondisi ideal sinyal trapezoidal BEMF ini sangat membantu dalam menentukan komutasi dengan baik. Pada Gambar 10 menunjukkan komutasi sinyal *pulse width modulation* (PWM) yang digunakan untuk *switching* pada *gate* mosfet inverter 3 fasa yang didapatkan dari tegangan BEMF yang telah dilakukan menggunakan filter FIR. Pada gelombang BEMF yang sudah difilter diolah menjadi *six step commutation* untuk menjalankan motor BLDC *sensorless*. Untuk tiap fasa *high* dan fasa *low* memiliki perbedaan sudut penyulutan sebesar 120° dan untuk masing-masing antara *high* dan *low* memiliki nilai *dead time* sebesar 60° .

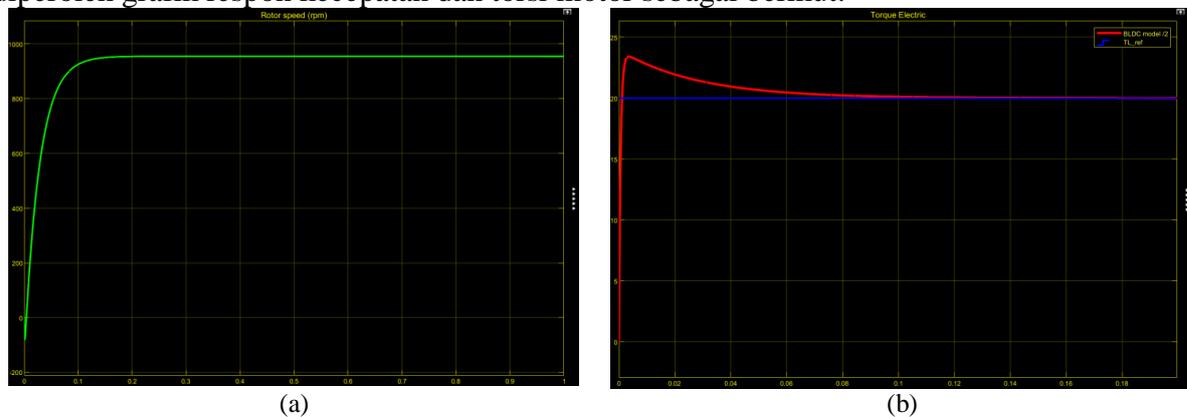
Pengujian simulasi pemodelan motor BLDC untuk membuktikan pengaruh filter FIR terhadap kinerja motor yang dijalankan, maka dilakukan dengan dua kondisi yaitu sistem dijalankan tanpa beban dan berbeban serta digunakan kontrol PI agar respon kecepatan motor mendekati *set point* yang ditentukan, pada pengujian simulasi pemodelan menggunakan *set point* 1000 RPM.



(a) (b)
Gambar 11. Pengujian Sistem Simulasi Pemodelan Tanpa Beban

Pengujian kondisi tanpa beban pada Gambar 11. (a) dan (b), dilakukan pengujian dengan memberikan *set point* kecepatan referensi 1000 RPM dan dapat dilihat dari hasil pengujian simulasi untuk kecepatan yang terukur pada Gambar 11. (a) di mana respon menunjukkan pada nilai kecepatan motor 1000 RPM tetapi membutuhkan waktu yang cukup lama untuk mencapai nilai *steady state* dan Torsi motor pada Gambar 11. (b) akan stabil dan pada waktu 0,02 detik.

Pengujian selanjutnya yaitu pengujian sistem dengan diberikan beban sebesar 20 Nm pada *step time* 1 detik dengan *set point* referensi nilai kecepatan motor 1000 RPM juga. Maka diperoleh grafik respon kecepatan dan torsi motor sebagai berikut:



(a) (b)
Gambar 12. Pengujian Sistem Simulasi Pemodelan Berbeban

Pada Gambar 12. (a) merupakan grafik respon kecepatan ketika diberikan beban, yang mana kecepatan motor lebih lambat pada saat mencapai *steady state* karena saat diberikan torsi load sebesar 20 Nm pada *step time* 1 detik yaitu menjadi 960 RPM dengan prosentase *error* sebesar 4 %. Selanjutnya, pada Gambar 12. (b) merupakan respon torsi elektrik motor yang mengalami *over shoot* karena pembebanan dan baru mencapai *steady state* torsi pada 0,18 detik yang cenderung lebih lama dari pada tanpa pembebanan. Selain itu pengaruh BEMF yang mudah dibaca oleh sistem komutasi juga turut membantu meningkatkan performa motor BLDC *sensorless*.

IV. KESIMPULAN

Dari pembahasan di atas, yaitu mengenai peredaman *noise* untuk deteksi BEMF pada motor BLDC *sensorless* menggunakan digital filter didapat beberapa kesimpulan di antaranya sebagai berikut:

1. *Finite impulse response filter* dapat memperbaiki sinyal tegangan BEMF yang memiliki *noise* yang cukup besar dan dapat mempengaruhi penentuan komutasi yang sulit untuk mengolah sinyal tegangan BEMF. Hasil simulasi sebelum dilakukan *filtering* gelombang memiliki frekuensi sebesar 34,76 Hz kemudian direduksi dengan menghilangkan *noise*

pada gelombang menggunakan filter FIR menjadi 21,25 Hz mendekati gelombang trapezoidal yang ideal, maka membuat sinyal tegangan BEMF dapat mempermudah dalam penentuan komutasi untuk *switching* mosfet inverter 3 fasa.

2. Pada pengujian sistem tanpa beban, dengan *set point* 1000 RPM *output* respon kecepatan motor sesuai dengan *set point* dan respon torsi motor cepat menuju *steady state* yaitu pada 0,02 detik. Pada pengujian sistem berbeban, dengan *set point* 1000 RPM serta perubahan beban sebesar 20 Nm diperoleh prosentase *error* pada kecepatan motor sebesar 4 % dan torsi motor menuju *steady state* pada waktu 0,18 detik. Selain itu dengan pengaruh filter dapat lebih memaksimalkan performa motor BLDC *sensorless*.

REFERENSI

- [1] Kanhare, N., Dani, B. S., & Hiwase, U. E. *Brushless DC Motor Drive Using Sensorless Control Back EMF Zero Crossing Detection and Filter Technique*, 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). Chennai, India. 2016; 4288-4291.
- [2] Sandre-Hernandez, O., Ordaz-Oliver, P., & Cuvas-Castillo, C. *Sensorless Field Oriented Control of BLDC Motor Based on Sliding Mode Observer*, 2019 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE). Cuernavaca, Mexico. 2019; 119-124.
- [3] Murugan, M., Jayabharath, R., & Gurunathan, C. Rotor Position Sensorless Control of BLDC Motor based on Back Emf Detection Method. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*. 2015; 14(2): 222-227.
- [4] Liu, Y., Xu, L., Miao Wang, M., & Jin, M. *Stepping Vector Control of BLDC Motor*. 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). Beijing, China. 2014; 1-6.
- [5] Mooniarsih, N.T. Desain dan Simulasi Filter FIR Menggunakan Metode Windowing. *Jurnal ELKHA*, 2010; 2(1): 41-47.
- [6] Lidyawati, L., Rahmiati, P., & Sunarti, Y. Implementasi Filter Finite Impulse Response (FIR) Window Hamming dan Blackman menggunakan DSK TMS320C6713. *Jurnal ELKOMIKA*. 2016; 4(1): 16-30.