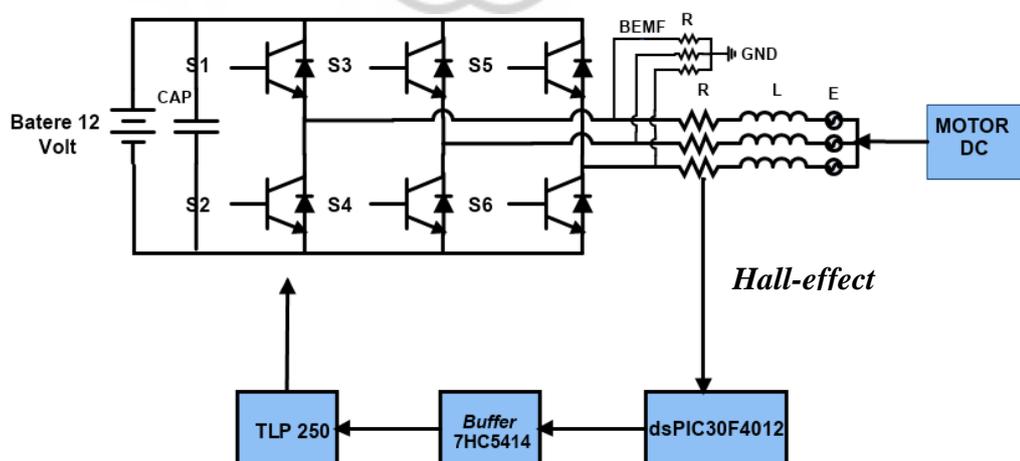


BAB III

IMPLEMENTASI *HARDWARE* MOTOR BLDC UNTUK PENEREMAN REGENERATIF

3.1. Pendahuluan

Pada bab ini dijelaskan tentang *hardware* yang digunakan untuk mengimplementasikan pengereman regeneratif pada motor BLDC. Hardware yang digunakan antara lain Inverter tiga fasa yang berfungsi sebagai konverter pengendali motor BLDC. Inverter tiga fasa yang digunakan yaitu modul IGBT. Dalam menjalankan IGBT diperlukan driver TLP 250 dan *buffer* IC 74HC541N. IGBT dijalankan sesuai perintah mikrokontroler dsPic30F4012, sehingga motor BLDC dapat melakukan pengereman regeneratif. Pengereman regeneratif di atur dengan pengaturan siklus kerja. Sensor arus LEM HX-10P terpasang pada perangkat keras ini untuk mengukur arus yang dapat masuk ke batere. Untuk lebih jelasnya dibahas pada bab ini.



Gambar-3. 1. Skema Sistem Kendali Motor BLDC

3.2. Motor BLDC

Motor BLDC yang digunakan pada tugas akhir ini memiliki enam kutub stator dan empat kutub rotor. Motor BLDC yang digunakan adalah tipe FXD57BL115S18-240TF-001A. Motor ini menggunakan lilitan stator dengan tipe *star* / bintang. Pada konstruksi motor ini juga terpasang tiga buah *hall-effect* dengan jarak pemasangan tiap *hall-effect* 120 derajat elektrik. Spesifikasi motor BLDC yang lengkap dapat di lihat pada Tabel-3.1.

Tabel-3. 1. Spesifikasi motor BLDC yang dipakai

Model	FXD57BL115S18-240TF-001A
Nilai Tegangan	24 Volt
Nilai Arus	11 A
Nilai Kecepatan	4000 RPM
Daya Keluaran	180 W
Jumlah Kutub	4 buah
Panjang <i>Body</i>	115 mm
Massa	0.8 Kg

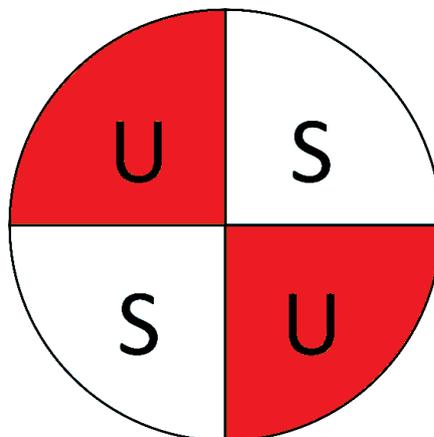
Pada motor BLDC tipe ini terdapat tiga kabel fasa yaitu fasa A diwakilkan oleh kabel berwarna kuning, fasa B diwakilkan oleh kabel berwarna merah, dan fasa C diwakilkan oleh kabel berwarna hitam. Seperti yang disebutkan sebelumnya, lilitan fasa pada motor tipe ini terhubung bintang.

Motor BLDC memiliki kelebihan pada konstruksinya yaitu tidak terdapat lilitan pada bagian rotor dan tidak terdapat sikat komutasi. Dengan kelebihan yang dimiliki tersebut motor BLDC memiliki umur kerja yang panjang, hal ini disebabkan karena tidak adanya gesekan antara sikat komutasi dengan rotor. Terdapat empat kutub magnet pada rotornya yang dapat di lihat pada Gambar-3.1.

Pada saat rotor magnet berputar menyebabkan stator menghasilkan EMF balik. Dalam tugas akhir ini EMF balik akan digunakan untuk melakukan *boost* tegangan untuk menghasilkan tegangan keluaran yang melebihi tegangan batere dengan cara melakukan pensaklaran pada sudut puncaknya. Namun, untuk menentukan sudut pensaklarannya perlu diketahui sudut operasi dari *hall-effect* terlebih dahulu yang digunakan sebagai referensi pada saat pengereman. Tegangan kerja maksimal yang dimiliki oleh motor BLDC ini adalah 24 Volt DC.

3.2.1. Konstruksi Rotor Motor Brushless Direct Current

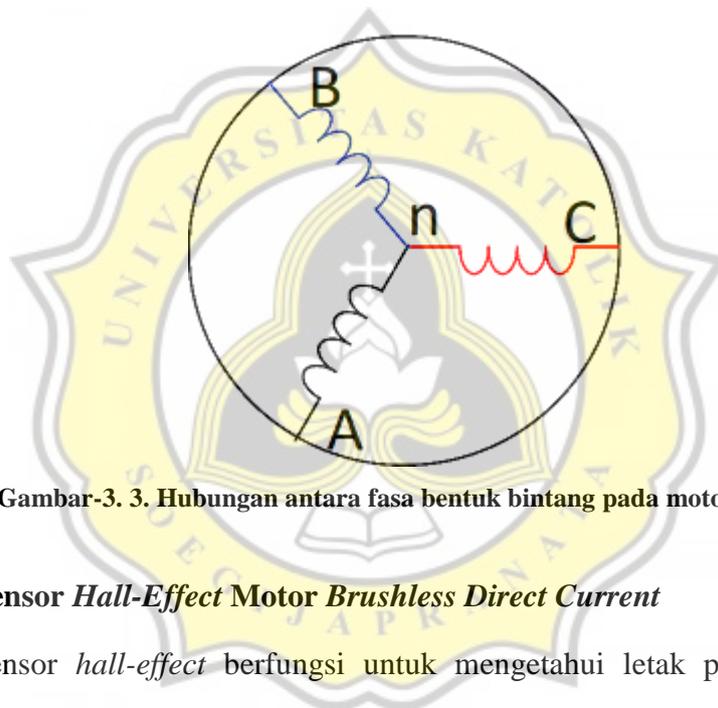
Salah satu bagian yang utama pada motor BLDC adalah rotor. Rotor adalah bagian yang bergerak pada motor BLDC. Rotor pada motor ini memiliki empat kutub dengan jumlah kutub utara dan selatan yang sama. Jumlah kutub pada rotor motor BLDC dapat mempengaruhi torca yang dihasilkan. Pada Gambar-3.2. dapat di lihat sketsa gambar dari konstruksi rotor pada motor BLDC, dan dapat di lihat juga magnet yang terpasang pada rotor BLDC di pasang saling berlawanan tiap sisinya.



Gambar-3. 2. Konfigurasi kutub magnet pada rotor motor BLDC

3.2.2. Konstruksi Stator Motor *Brushless Direct Current*

Bagian utama lain pada motor BLDC adalah stator. Stator adalah bagian yang diam dari motor BLDC. Stator pada motor ini memiliki tiga pasang atau enam buah kutub yang tersambung secara bintang seperti Gambar-3.3. kemudian rangkaian tersebut dihubungkan ke *inverter* tiga fasa. Fasa A, fasa B, dan fasa C terhubung dengan skema bintang dengan titik netral (N) sebagai titik temu.



Gambar-3. 3. Hubungan antara fasa bentuk bintang pada motor BLDC

3.2.3. Sensor *Hall-Effect* Motor *Brushless Direct Current*

Sensor *hall-effect* berfungsi untuk mengetahui letak posisi rotor pada motor BLDC agar dapat berputar. Cara kerja sensor *hall-effect* yaitu apabila terkena magnet dengan polaritas yang berbeda, akan mengeluarkan tegangan 5 Volt (*high*) dan 0 Volt (*low*) atau sebaliknya. Pada umumnya motor BLDC mempunyai tiga buah sensor *hall-effect* yang terpasang pada tiap statornya. Setiap pemasangan sensor *hall-effect* sebagian besar berjarak 60 derajat atau 120 derajat mekanik antar sensor. Dari pemasangan sensor dengan sudut tertentu, didapatkan hasil enam logika kemungkinan keluaran sensor *hall-effect* yaitu: 001, 101, 100,

110, 010, dan 011. Hasil enam logika tersebut akan menjadi masukan pada data mikrokontroller. Dengan mengambil percobaan dari pembacaan logika keluaran sensor *hall-effect* dapat disajikan pada Tabel-3.2. sebagai berikut:

Tabel-3. 2. Hasil pembacaan logika sensor *hall-effect* dan pensaklaran

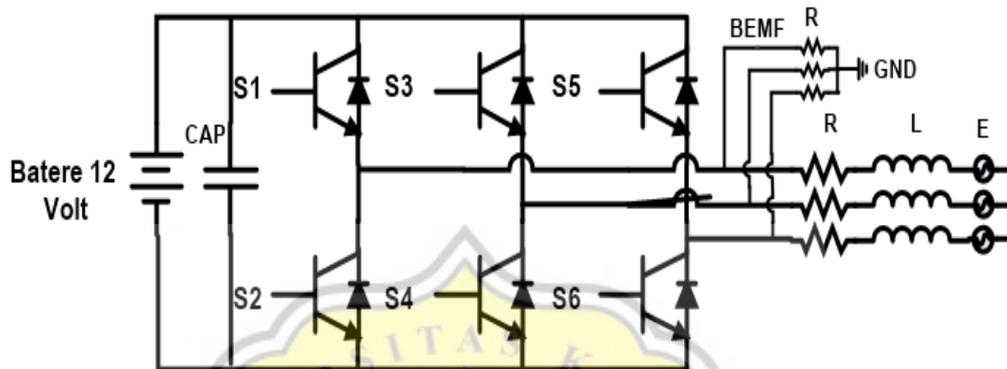
No	H ₁	H ₂	H ₃	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆
1	0	1	1	0	0	1	0	0	1
2	0	0	1	1	0	0	0	0	1
3	1	0	1	1	0	0	1	0	0
4	1	0	0	0	0	0	1	1	0
5	1	1	0	0	1	0	0	1	0
6	0	1	0	0	1	1	0	0	0

Dari hasil tabel di atas, dapat digunakan sebagai acuan untuk membuat suatu program agar motor BLDC dapat berputar. Logika hasil pensaklaran sedikit berbeda pada biasanya. Hal ini karena logika pada saklar *inverter* di fungsikan sebagai *boost* konverter.

3.2.4. Back Electro Motive Force (BEMF)

Tegangan BEMF (EMF balik) yang dihasilkan oleh motor BLDC diambil dari tegangan AN, BN, dan CN. Namun pada motor BLDC dengan tipe FXD57BL115S18-240TF-001A yang digunakan oleh penulis tidak memiliki titik netral di bagian luar motor. Maka dari itu diperlukan titik netral virtual sebagai gantinya. Titik netral virtual dapat dibuat dengan menyambungkan tiga buah resistor seperti Gambar-3.4. dengan nominal masing masing 10KΩ. Ketiga

resistor ini digunakan untuk mendeteksi EMF balik pada masing-masing fasa dan untuk mengamankan modul yang lain dari amplituda EMF balik yang tinggi.



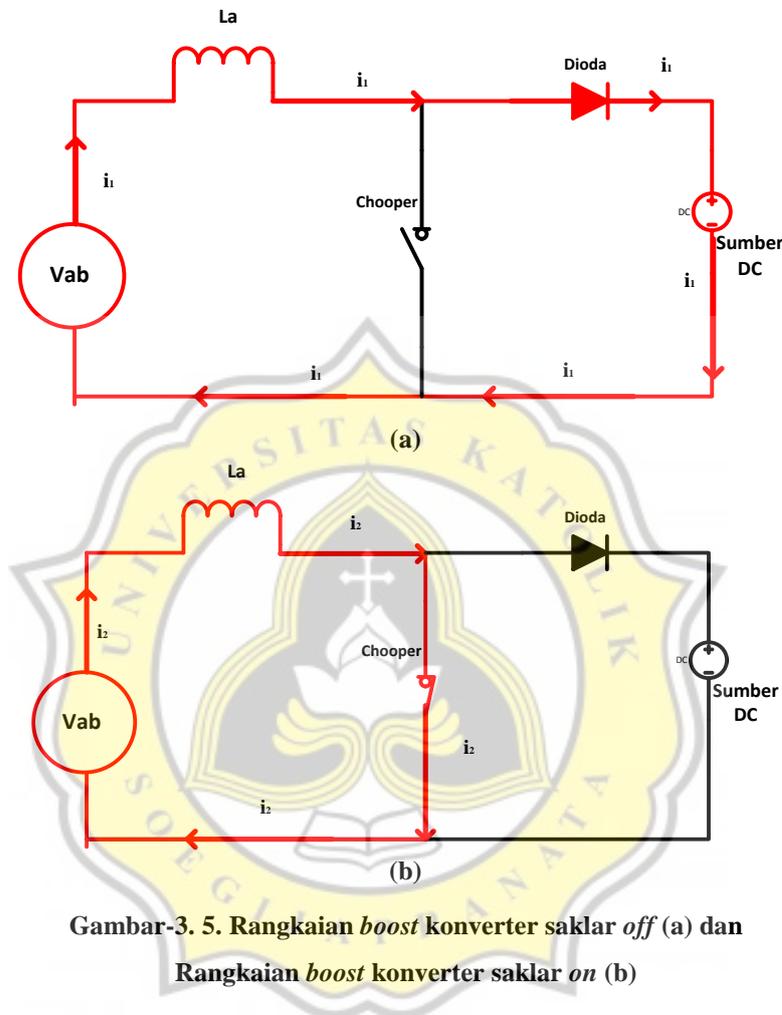
Gambar-3. 4. Rangkaian BEMF detektor yang tersambung pada motor BLDC

3.3. Prinsip Kerja Pengereman Regeneratif Motor BLDC

Prinsip kerja pada pengereman regeneratif adalah motor BLDC digerakan oleh roda yang memiliki inersia, dalam tugas akhir ini di wakili oleh motor DC yang telah dihubungkan untuk menghasilkan pengereman regeneratif. Sehingga menghasilkan gaya gerak listrik (GGL) atau tegangan pada statornya. Keluaran dari stator menghasilkan tegangan lebih rendah daripada tegangan pada batere. Proses ini memerlukan penguat yang dioperasikan inverter sebagai *boost* konverter.

Saklar yang digunakan pada *boost* konverter bertindak sebagai saklar yang dapat membuka (*off*) atau menutup (*on*) sehingga arus yang masuk pada rangkaian dapat dikendalikan sesuai dengan *duty cycle* (siklus kerja) yang diinginkan. Semakin besar siklus kerja yang diinginkan, maka semakin besar tegangan keluaran sehingga menyebabkan arus untuk pengisian daya batere menjadi lebih

besar. Rangkaian *boost* konverter saat saklar *off* dan *on* dapat di lihat pada Gambar-3.5.



Gambar-3. 5. Rangkaian *boost* konverter saklar *off* (a) dan Rangkaian *boost* konverter saklar *on* (b)

Mode operasi *boost* konverter dibagi menjadi dua, di antaranya yaitu mode *continous* dan *discontinous*. Mode *continous* merupakan mode di mana arus yang dihasilkan oleh induktor tidak pernah sampai nol saat saklar pada rangkaian dalam keadaan *off*. Sedangkan pada mode *discontinous* arus yang dihasilkan oleh induktor dapat mencapai nilai nol. Berikut ini persamaan dari mode *continous* dan *discontinous* sebagai berikut:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-d} \quad (3-1)$$

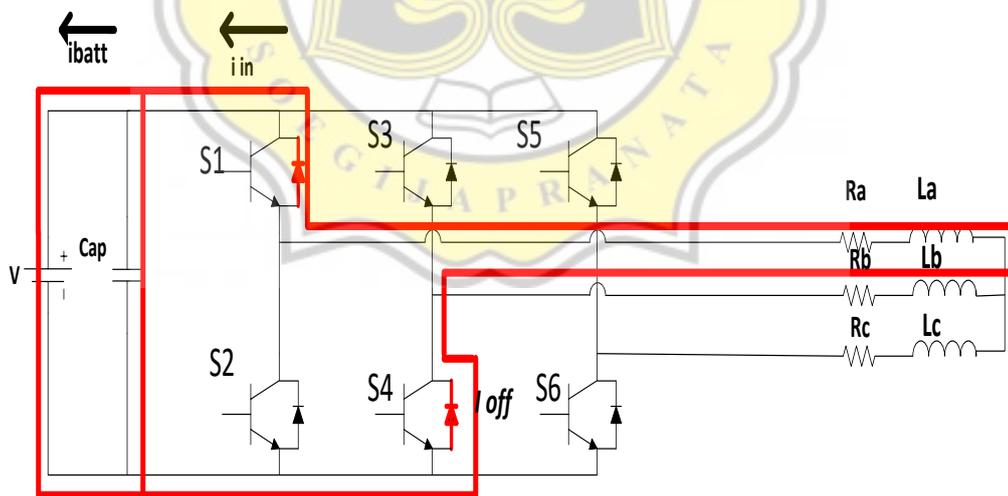
di mana:

V_o = adalah tegangan keluaran

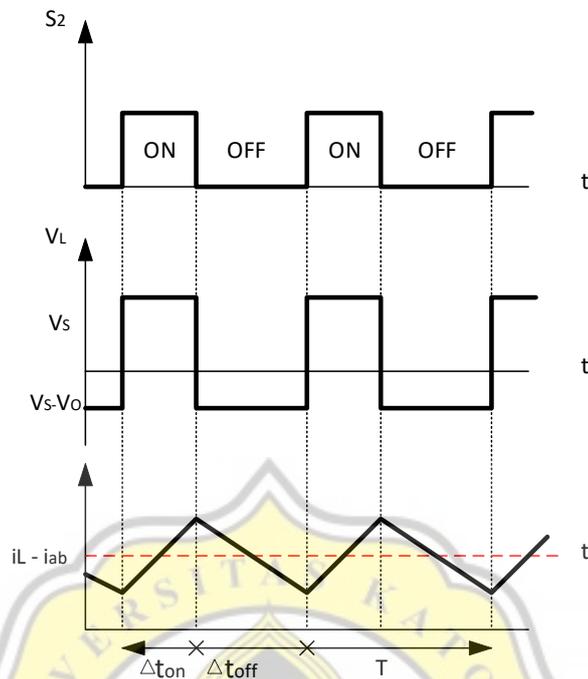
V_i = adalah tegangan batere

d = siklus kerja

Mode operasi pengereman regeneratif dioperasikan untuk memperoleh perlambatan motor BLDC dan meningkatkan arus yang digunakan untuk pengisian daya ke batere. Pada tugas akhir ini hal tersebut dilakukan dengan cara mengoperasikan saklar genap pada konverter dengan pola pensaklaran menggunakan referensi kondisi dari *hall-effect*. Pada Gambar-3.6. dapat di lihat aliran arus untuk operasi *boost chopper* pada saat pengereman regeneratif.



Gambar-3. 6. Aliran arus saat pengereman regeneratif



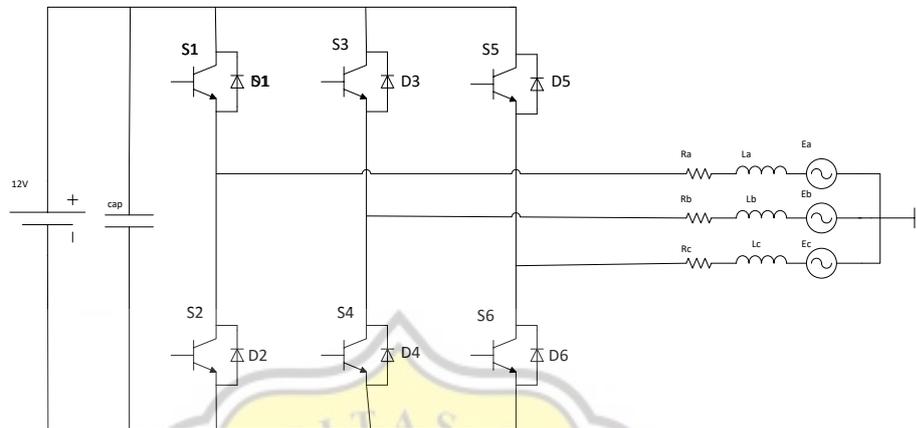
Gambar-3. 7. Pensaklaran pada saat pengereman

Pada Gambar-3.7. dapat dijelaskan saat saklar S_2 dalam keadaan menyala (*on*) arus mengalir dari titik a ke titik b, pada kondisi ini arus akan mengisi induktor. Ketika saklar S_2 dalam keadaan *off* arus akan mengalir melalui dioda untuk kemudian digunakan sebagai pengisi daya baterai.

3.4. Rangkaian Inverter Tiga Fasa IGBT

Inverter tiga fasa berfungsi untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC secara sekuensial. Pada tugas akhir ini digunakan inverter tiga fasa jenis IGBT. IGBT yang digunakan pada tugas akhir ini adalah IGBT tipe CPV364M4F yang proses pensaklarannya sangat cepat yaitu 100 KHz. Kapasitas tegangan pada IGBT tipe ini juga sangat tinggi yaitu 600 Volt. Spesifikasi yang di

miliki IGBT ini sangat memungkinkan menjadi *driver* motor BLDC dengan pensaklaran yang sangat bagus.

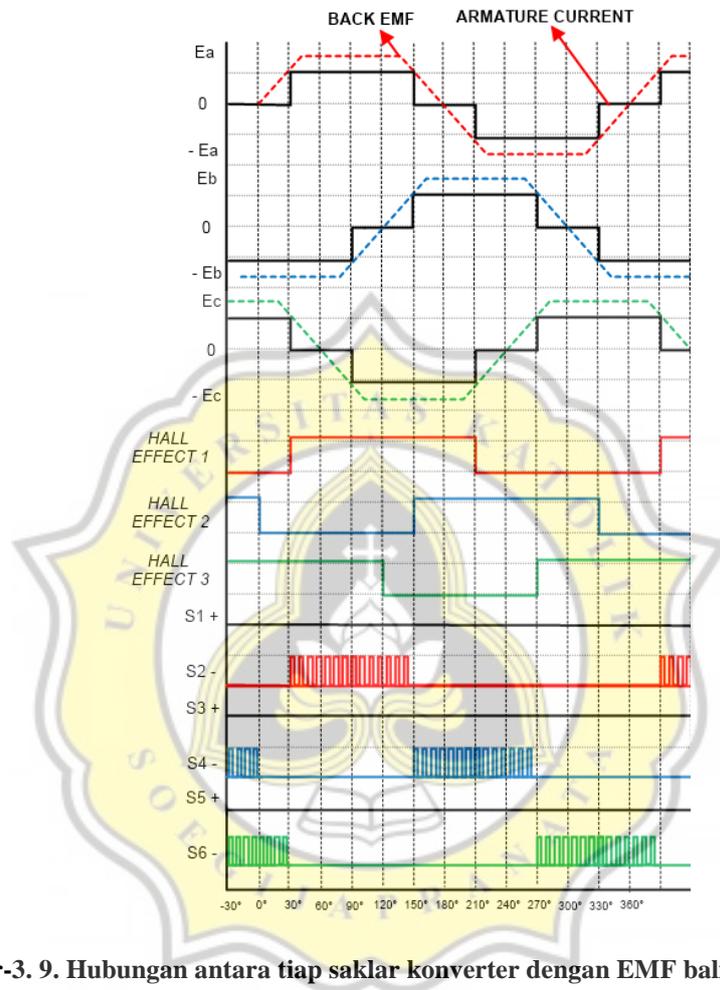


Gambar-3. 8. Rangkaian Modul IGBT yang Terpasang pada Motor BLDC

IGBT tipe CPV364M4F terdiri dari enam buah saklar statis yang terhubung pada tiap fasa stator motor BLDC (Gambar-3.8.). IGBT dikendalikan oleh *driver optocoupler* TLP 250. *Driver* dikendalikan oleh mikrokontroler dsPIC30F4012. Mikrokontroler mengolah sinyal yang didapatkan dari referensi data BEMF motor BLDC. Saklar – saklar pada IGBT dikendalikan dengan menggunakan referensi dari *hall-effect*.

Hubungan antara fasa AN, fasa BN, fasa CN dan *hall-effect* dan durasi *switching* pensaklaran dapat di lihat pada Gambar-3.9. Fasilitas *input capture* yang tersedia pada dsPIC30F4012 dengan referensi dari *hall-effect* pada setiap fasa dapat membantu proses *switching* pada pengereman regeneratif. Perubahan dari *switching* pensaklaran IGBT dapat disajikan pada S2, S4, S6 pada inverter tiga fasa. Mengacu pada 360° elektrik tegangan BEMF pada masing masing fasa. Fasa Ean ditunjukkan pada saklar S2, fasa Ebn ditunjukkan pada saklar S4, dan fasa

Ecn pada saklar S6. Durasi pola pensaklaran ON dan OFF pada saklar S2 adalah $30^\circ - 150^\circ$, pada saklar S4 adalah $150^\circ - 270^\circ$, pada saklar S6 adalah $270^\circ - 30^\circ$.



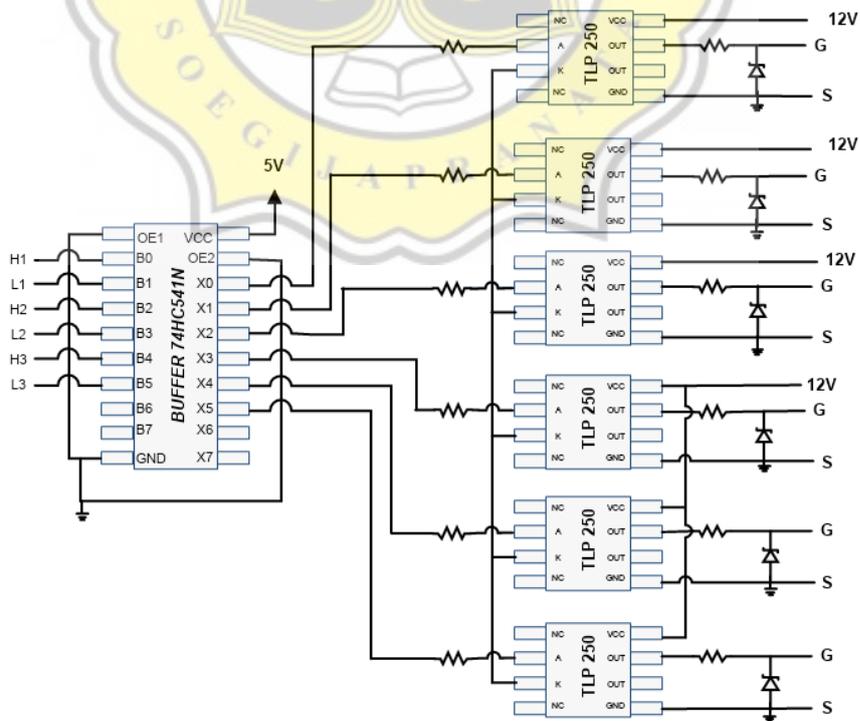
Gambar-3. 9. Hubungan antara tiap saklar konverter dengan EMF balik dan *hall-effect*

3.5. Rangkaian *Driver Tlp 250* Dan *Buffer 74HC541N*

Rangkaian *driver* berfungsi sebagai penghubung pensaklaran antara rangkaian control dengan rangkaian daya. Rangkaian driver yang digunakan terdiri dari enam buah TLP 250 dan satu *buffer 74HC541N*. *Buffer* ini berfungsi untuk menguatkan tegangan keluaran pada mikrokontroler dsPIC30F4012. *Buffer*

ini difungsikan agar keluaran dari dsPIC30F4012 tidak mengalami penurunan sehingga proses pensaklaran pada IGBT bekerja secara optimal.

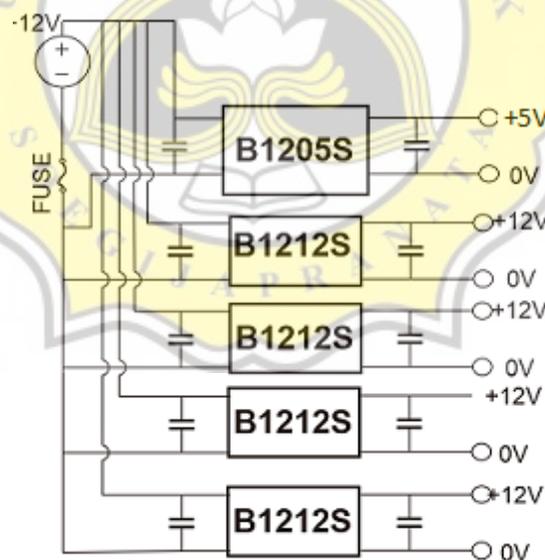
IC *optocoupler* TLP 250 memerlukan tegangan 12 Volt untuk dapat bekerja. IC *optocoupler* TLP 250 memiliki delapan kaki, kaki nomor 8 merupakan $+V_{DD}$ dan kaki nomor 5 merupakan *ground* catudaya. Pensaklaran IC *optocoupler* TLP 250 berasal dari sinyal PWM yang dihasilkan dsPIC30F4012 yang dilewatkan melalui *buffer* 74HC541N menuju ke *optocoupler* TLP 250 melalui resistor. Resistor ini berfungsi untuk menghambat arus masuk pada TLP 250. TLP 250 menghasilkan sinyal PWM dengan tegangan telah di naikan menjadi 12 Volt. Sinyal PWM menghasilkan pola pensaklaran pada modul IGBT CPV364M4F. Gambar 3.10. adalah rangkaian blok driver *optocoupler* TLP 250 dan *buffer* 74HC541N.



Gambar-3. 10. Rangkaian *buffer* IC 74HC541N dan enam buah TLP 250

3.6. Catu daya B1212 dan B1205 *Isolated*

Rangkaian Catudaya memberikan sumber tegangan kepada rangkaian driver TLP 250, *buffer* 74HC541N dan mikrokontrol dsPIC30F4012. Rangkaian catudaya ini terdiri dari empat buah DC-DC *isolated* B1212 dan satu buah DC-DC *isolated* B1205. Rangkaian catudaya diberi sumber 12 Volt dari batere aki, kemudian dialirkan ke empat buah DC-DC *isolated* B1212 dan satu buah DC-DC *isolated* B1205. Dari sumber 12 Volt akan mengalirkan arus ke empat DC-DC *isolated* B1212 akan menghasilkan tegangan 12 Volt untuk memberikan daya pada rangkaian driver TLP 250 dan DC-DC *isolated* B1205 akan menghasilkan tegangan 5 Volt untuk menyuplai rangkaian kontrol. Gambar-3.11. merupakan rangkaian catudaya yang dibuat.

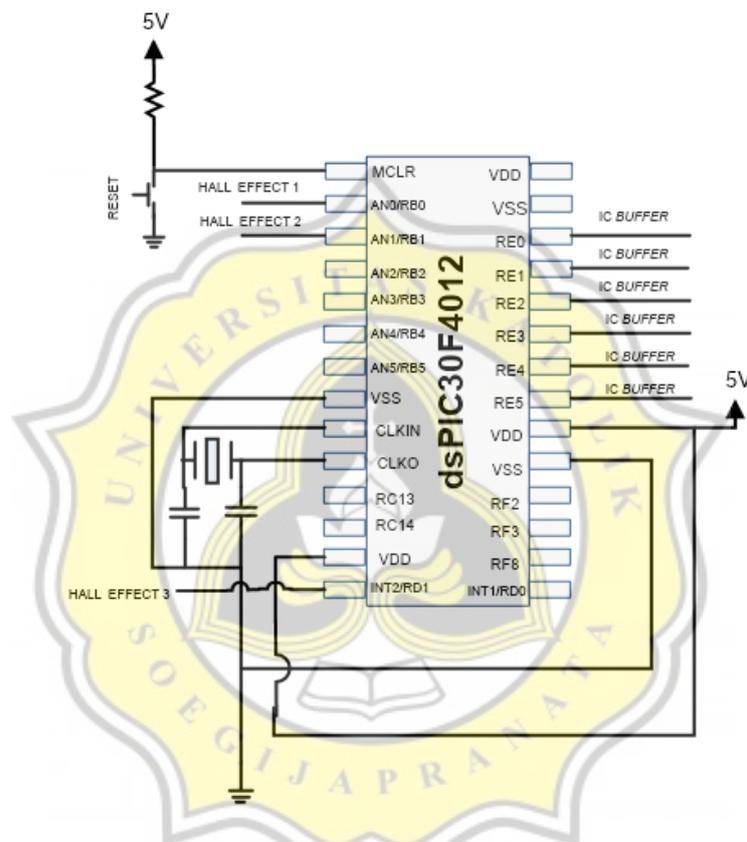


Gambar-3. 11. Rangkaian Catudaya B1205s dan B1212s

3.7. Blok Kendali

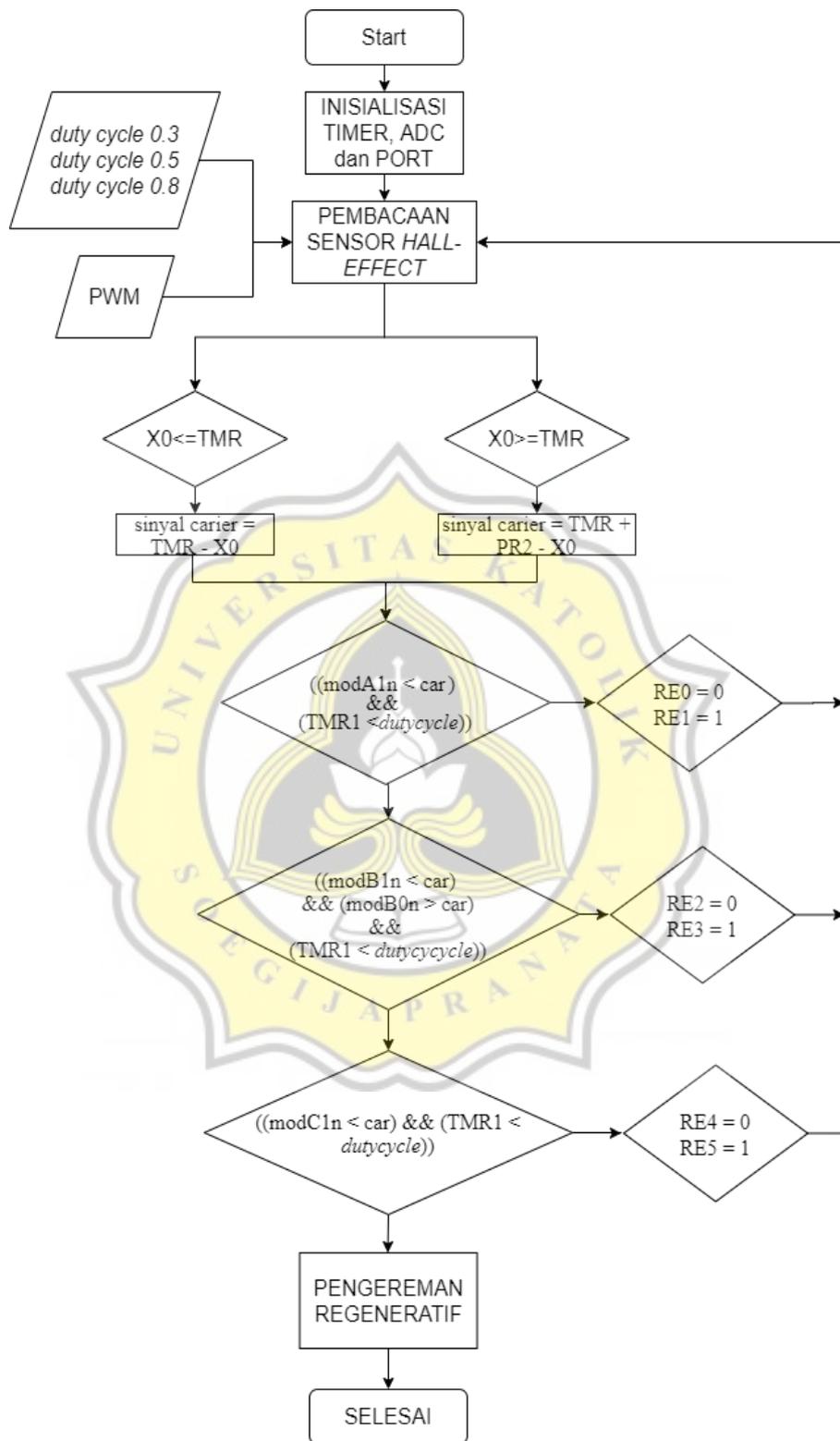
Blok kontrol yang digunakan pada *hardware* ini menggunakan mikrokontroller DSC (*Digital Signal Control*) berbasis digital dsPIC30F4012.

Mikrokontroller dsPIC30F4012 memiliki lebar data 16 bit yang dilengkapi dengan pengaturan 30 MIPS, sehingga mampu merespon dengan cepat dengan kecepatan tinggi. Pemograman mikrokontroller dsPIC30F4012 di lakukan menggunakan perangkat lunak *microC for dsPIC*.



Gambar-3. 12. Rangkaian Sistem Minimum Mikrokontroller dsPic30F4012

Mikrokontroller tipe dsPIC30F4012 merupakan kendali yang tepat pada motor BLDC karena memiliki kecepatan tinggi dalam pengolahan datanya. *Flow chart* pemograman kendali pengereman regeneratif pada motor BLDC dapat di lihat pada Gambar-3.13.



Gambar-3. 13 Flow chart pemrograman kendali pengereman regeneratif

juga tegangan yang dihasilkan dapat diatur sesuai yang dikehendaki. Hasil keluaran arus dan tegangan pada Tugas Akhir ini akan dibahas pada BAB IV berikut ini.

