

BAB III

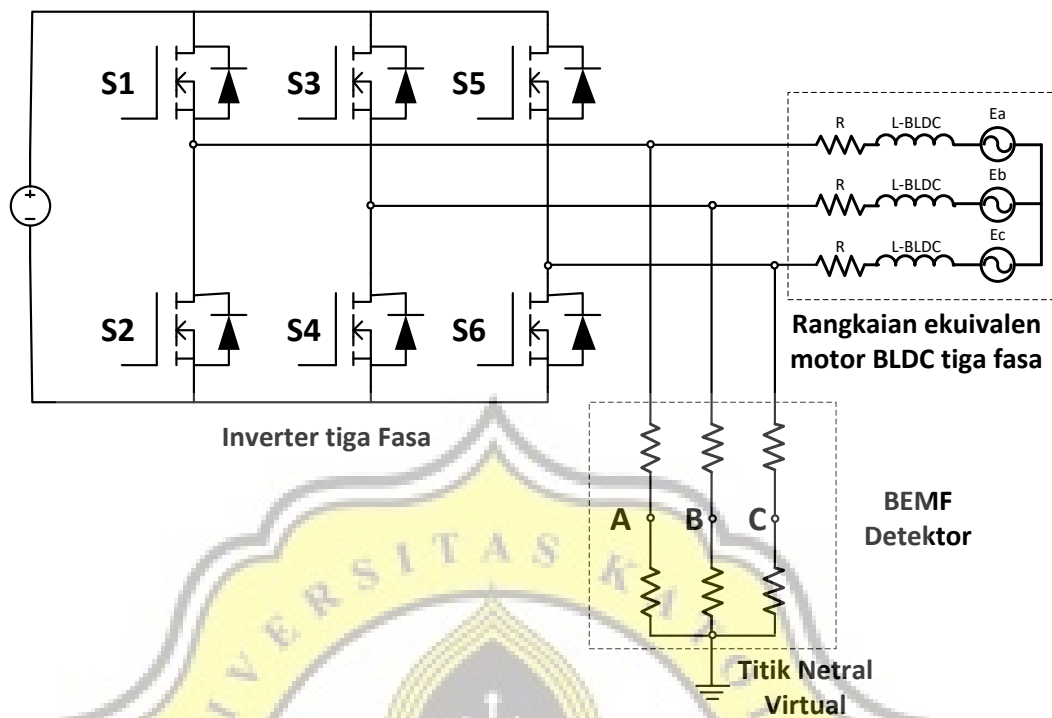
PERANCANGAN KENDALI MOTOR BLDC TANPA SENSOR

3.1. Pendahuluan

Pada bab ini dijelaskan tentang konstruksi motor BLDC dan langkah-langkah perancangan kendali tanpa sensor menggunakan referensi sinyal BEMF. BEMF dari motor BLDC diolah agar dapat digunakan sebagai referensi komutasi yang tepat pada stator, komutasi yang tepat menjadikan motor BLDC bekerja secara optimal. Modul pengolahan BEMF juga akan dijelaskan pada BAB ini. Modul yang digunakan adalah *BEMF detector*, *Low Pass Filter*, *Zero Crossing Detector*. Kemudian mikrokontroler dsPIC30F4012 dan *driver* MOSFET serta *Inverter* tiga fasa juga dijelaskan pada BAB ini. Sensor arus LEM HX-10P dipasang untuk mengukur gelombang arus yang dihasilkan.

3.2. Back Electromotive Force (BEMF) Detector

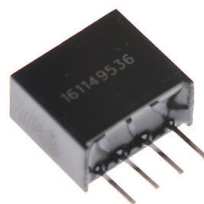
Tegangan BEMF yang dihasilkan oleh motor BLDC dapat diambil dari tegangan AN, BN, dan CN. Namun, motor BLDC tipe 42BLF01 yang digunakan oleh penulis tidak memiliki titik netral di luar motor, maka dari itu diperlukan titik netral virtual sebagai penggantinya. Titik netral virtual dapat dibuat dengan menyambungkan enam buah resistor seperti Gambar-3.1. tiga resistor bawah adalah untuk BEMF detektor, dan tiga resistor atas adalah untuk pembagi tegangan dan untuk mengamankan modul yang lain dari amplituda BEMF yang tinggi.



Gambar-3.1. Rangkaian BEMF detektor yang tersambung pada motor BLDC

3.3. Catu Daya DC-DC tipe B1212s dan B1205s *Isolated*

Driver pada *Inverter* tiga fasa memerlukan sumber tegangan DC sebesar 12V untuk operasinya. Mikrokontroler dsPIC30F4012 juga memerlukan sumber tegangan DC sebesar 5V untuk operasinya, oleh karena itu diperlukan sumber daya yang mensuplai masing-masing modul secara terisolasi.



Gambar-3.2. B1212s DC/DC Isolated

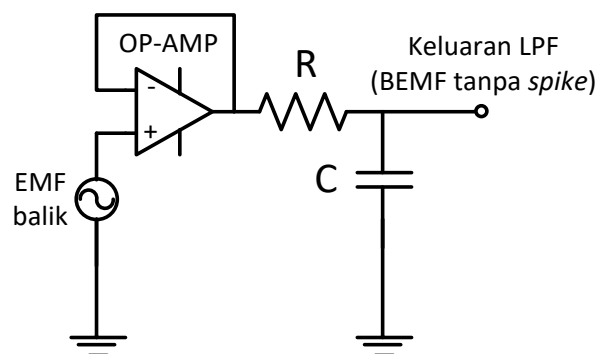
Suplai *driver* dan mikrokontroler menggunakan DC-DC *isolated* B1212s dan B1205s. DC-DC *isolated* B1212s dan B1205s menyalurkan tegangan dari 12V DC input menjadi 12V DC dan 5V DC *output*. *Output* yang dihasilkan oleh DC-DC *isolated* terisolasi satu sama lain, sehingga mampu digunakan sebagai *power supply* untuk *driver* dan mikrokontroler dsPIC30F4012.

Tabel-3.1. Spesifikasi DC-DC Isolated B1212s & B1205s

Tipe	Input		Output		
	Voltage (VOLT DC)		Voltage (VOLT DC)	Current (mA)	
	Nominal	Range		Max	min
B1205s	12	10.8-13.2	5	400	40
B1212s			12	167	17

3.4. Low Pass Filter (LPF)

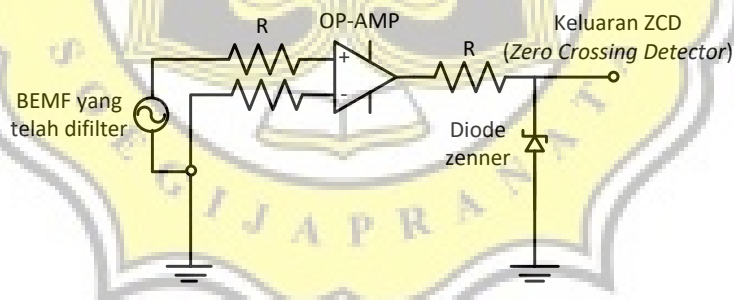
Sinyal BEMF yang diambil dari BEMF detektor masih mengandung riak tegangan. Hal tersebut merusak pembacaan sinyal yang akan dilakukan pada langkah-langkah selanjutnya. Maka dari itu diperlukan *Low Pass Filter* untuk menghilangkan riak tegangan dari BEMF tersebut. LPF yang digunakan adalah LPF aktif, rangkaian LPF aktif yang digunakan dapat di lihat pada Gambar-3.3.



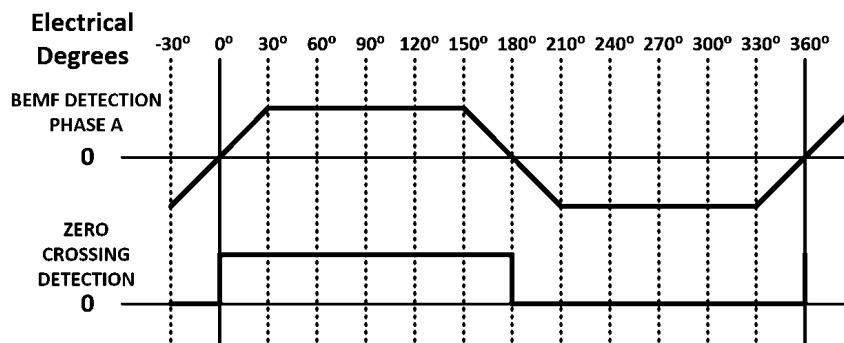
Gambar-3.3. Rangkaian *Low Pass Filter*

3.5. Zero Crossing Detector (ZCD)

Modul ini berfungsi untuk merubah BEMF yang semula sinyal trapezoidal menjadi sinyal digital. Sinyal BEMF dalam berbentuk trapezoidal diubah menjadi sinyal digital agar sinyal tersebut dapat dibaca oleh Mikrokontroler. ZCD merubah sinyal pada siklus positif BEMF (sinyal yang nilai tegangannya di atas nilai 0 Volt) menjadi sinyal DC 5 Volt DC dan pada siklus negatif menjadi sinyal 0 Volt. Satu perioda dari BEMF trapezoidal sama dengan satu perioda dari sinyal digital yang dihasilkan oleh ZCD. Karena satu perioda BEMF sama dengan 360 derajat elektrik, maka satu perioda sinyal digital tersebut juga merepresentasikan 360 derajat elektrik. Rangkaian ZCD yang digunakan pada tugas akhir ini dapat di lihat pada Gambar-3.4. dan sinyal keluaran yang dihasilkan ZCD dapat di lihat pada Gambar-3.5.



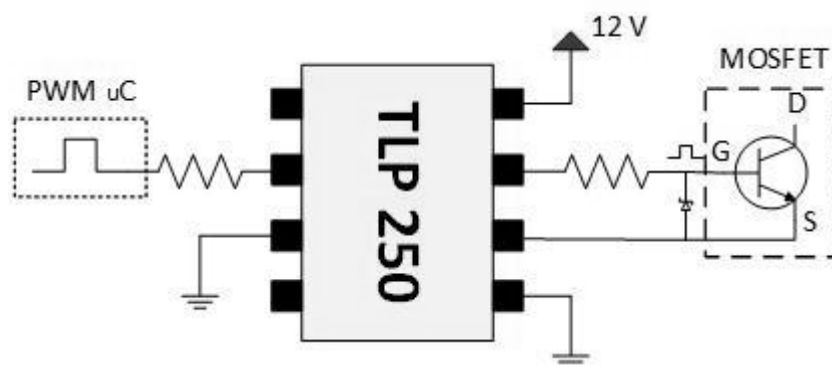
Gambar-3.4. Rangkaian Zero Crossing Detector



Gambar-3.5. Hasil Koversi dari BEMF trapezoidal menjadi sinyal digital oleh ZCD

3.6. Rangkaian *Driver*

Untuk dapat menjalankan motor BLDC rangkaian *driver* sangat dibutuhkan. Fungsi dari rangkaian *driver* adalah sebagai penghubung dan pengaman antara rangkaian kontrol dengan rangkaian daya. Rangkaian *driver* ini akan konduksikan MOSFET sesuai dengan perintah mikrokontroler. Rangkaian *driver* ini memiliki enam buah TLP250 dan sebuah *Buffer* yang berupa IC 74HC541N. *Buffer* ini berfungsi sebagai penguat dan pengunci tegangan keluaran dsPIC30F4012. IC *Buffer* tersebut dibutuhkan agar tegangan keluaran dari mikrokontroler dsPIC30F4012 tidak mengalami penurunan. Sehingga proses pensaklaran pada MOSFET terjadi secara optimal. Di dalam rangkaian *Buffer* ini terdapat dua buah gerbang NOT. Gerbang NOT pertama yang merubah sinyal digital Mikrokontroler yang telah *drop* (bernilai lebih dari 3 Volt dan kurang dari 5 Volt) menjadi bernilai 0 Volt. Kemudian gerbang NOT yang kedua berfungsi untuk meneruskan sinyal tegangan 0 Volt menjadi 5 Volt. Sedangkan *optocoupler* TLP250 berfungsi untuk merubah sinyal keluaran 5 Volt DC menjadi 12 Volt DC. TLP250 memerlukan tegangan *supply* 12 Volt DC saat beroperasi. Rangkaian *driver optocoupler* TLP250 dapat di lihat pada Gambar-3.6.



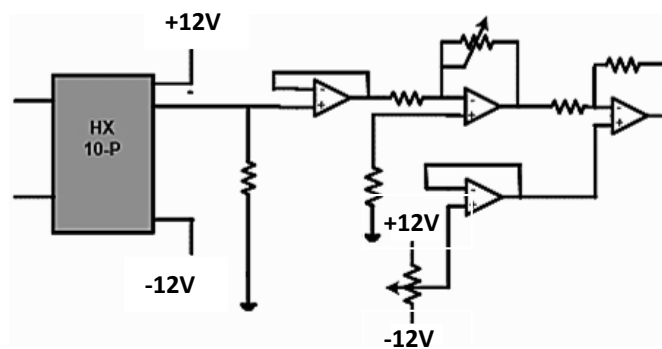
Gambar-3.6. Rangkaian *optocoupler* TLP250

Keterangan :

- a. Pin 1 dan 4 tidak difungsikan dan tidak terhubung kemanapun
- b. Pin 2 untuk *input* sinyal PWM dari mikrokontroler
- c. Pin 3 untuk *ground* mikrokontroler
- d. Pin 5 untuk *ground* dari catu daya TLP250
- e. Pin 6 dan 7 sebagai *output* dari sinyal PWM
- f. Pin 6 sebagai *input* catu daya (+12V)

3.7. Rangkaian Sensor Arus LEM HX 10-P

Sensor arus diperlukan untuk mengukur hasil gelombang arus yang dihasilkan motor BLDC. Sensor arus juga berfungsi untuk mengkonfirmasi hasil dari teori dan kenyataan dari alat tugas akhir motor BLDC. Data ini yang nantinya digunakan untuk mengembangkan topik kendali tanpa sensor dengan lebih dalam. Sensor arus yang digunakan oleh penulis adalah sensor arus dengan tipe LEM HX 10-P. Sensor ini memiliki batasan arus maksimal yang melewatinya adalah 10 A. Namun keluaran dari sensor arus ini perlu diperkuat agar data gelombang yang dihasilkan menjadi lebih jelas. Skema rangkaian sensor arus ini dapat di lihat pada Gambar-3.7.

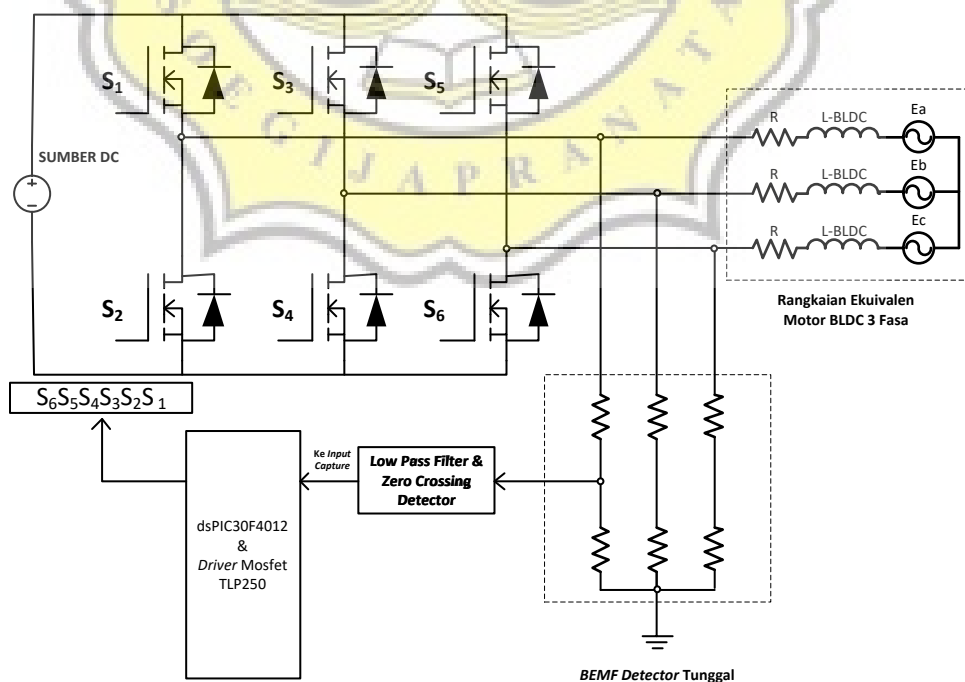


Gambar-3.7. Skema rangkaian sensor arus

Cara kerja dari skema sensor arus ini adalah mengkonversi pembacaan arus menjadi berbentuk gelombang tegangan. Perbandingan arus dan tegangan yang dihasilkan dapat diatur sesuai dengan yang diinginkan.

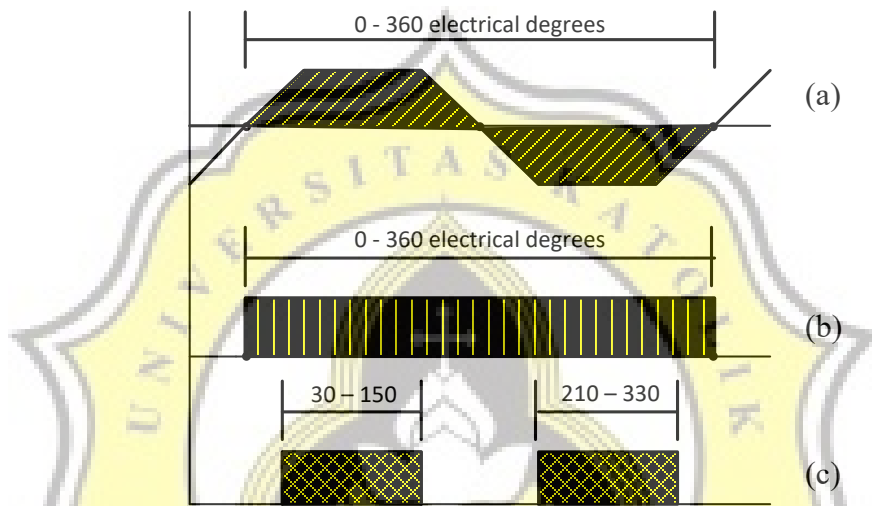
3.8. Rangkaian *Inverter* Tiga Fasa Untuk Motor BLDC

Motor BLDC memerlukan *Inverter* tiga fasa sebagai konverter untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC secara sekuensial. *Inverter* tiga fasa terdiri dari enam buah saklar statis MOSFET yang masing masing lengannya terhubung dengan fasa-fasa stator pada motor BLDC. MOSFET dikendalikan oleh *driver optocoupler* TLP250. *Driver* dikendalikan oleh mikrokontroler. Mikrokontroler mendapat referensi data dari BEMF motor BLDC yang sudah diolah. Untuk lebih jelasnya rangkaian penuh blok kendali, konverter, dan rangkaian ekuivalen motor BLDC tiga fasa dapat di lihat pada Gambar-3.8.



Gambar-3.8. Rangkaian Penuh Blok Kendali, Konverter, dan Motor BLDC

Saklar-saklar pada *Inverter* tiga fasa dikendalikan dengan kendali tanpa sensor. Referensi dari kendali tanpa sensor adalah dari BEMF pada fasa A. Hubungan antara tiap-tiap saklar dengan BEMF fasa A dapat di lihat pada Gambar-3.10. cara pembacaan diagram yang disediakan oleh penulis dapat di lihat pada Gambar-3.9.

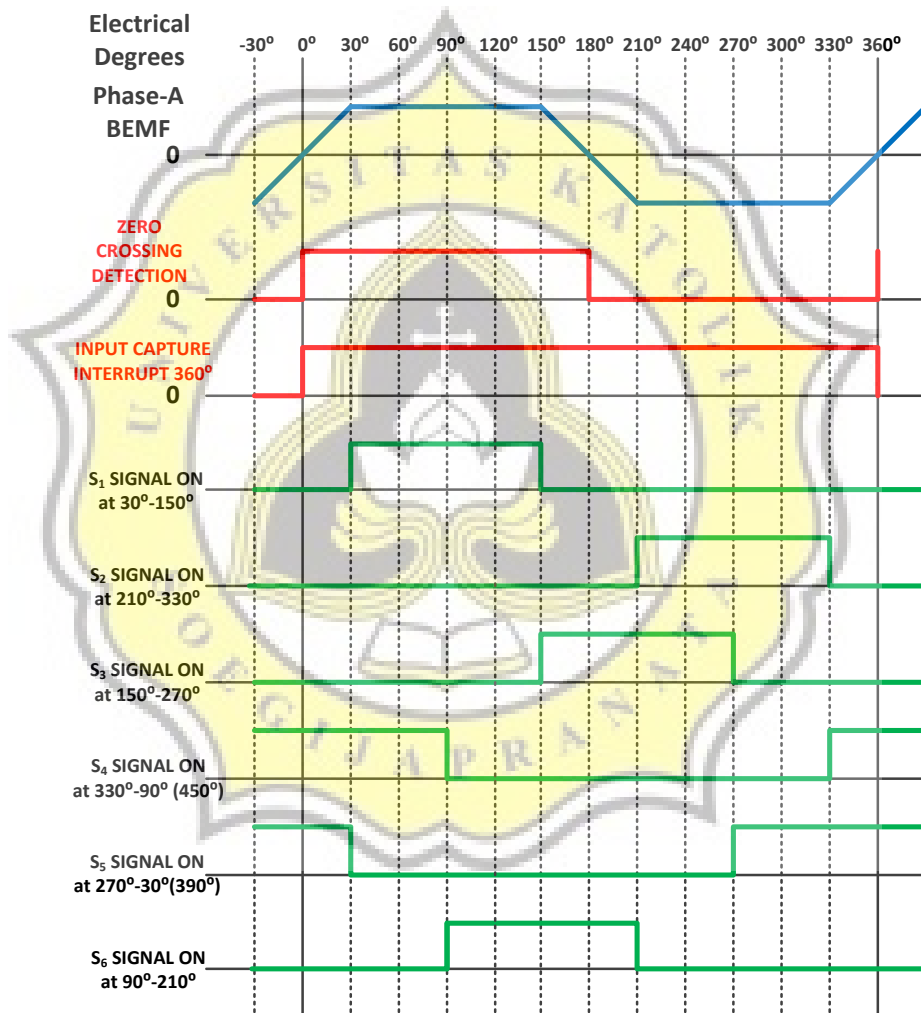


Gambar-3.9. (a) Gelombang BEMF (b) hasil pembacaan *input capture* (c) hasil perhitungan *input capture* pada $30^{\circ} - 150^{\circ}$ dan $210^{\circ} - 330^{\circ}$.

Pada Gambar-3.9. dapat di lihat bahwa BEMF trapezoidal menggambarkan 360° elektrik. Dengan data tersebut, mikrokontroler mengolah sinyal pada sudut $30^{\circ} - 150^{\circ}$ dan $210^{\circ} - 330^{\circ}$ dengan referensi perioda 360° elektrik BEMF trapezoidal. Sinyal keluaran tersebut di dapat dari hasil perhitungan menggunakan rumus yang telah dimasukkan pada algoritma mikrokontroler.

Sudut komutasi yang tepat dapat ditentukan dengan memasukkan standar sudut komutasi yang sesuai dengan referensi BEMF, hubungan BEMF dengan sudut komutasi dapat di lihat pada Gambar-3.10. BEMF telah tergeser

dikarenakan pemasangan LPF. Pergeseran fasa ini berpengaruh buruk pada rentang kecepatan motor BLDC. Sehingga diperlukan kompensator untuk mengatasi pergeseran fasa yang disebabkan oleh LPF. Dengan menggeser kembali sudut komutasi sesuai dengan *error* pergeseran BEMF dapat di dapatkan sudut komutasi yang tepat untuk rentang kecepatan yang luas.



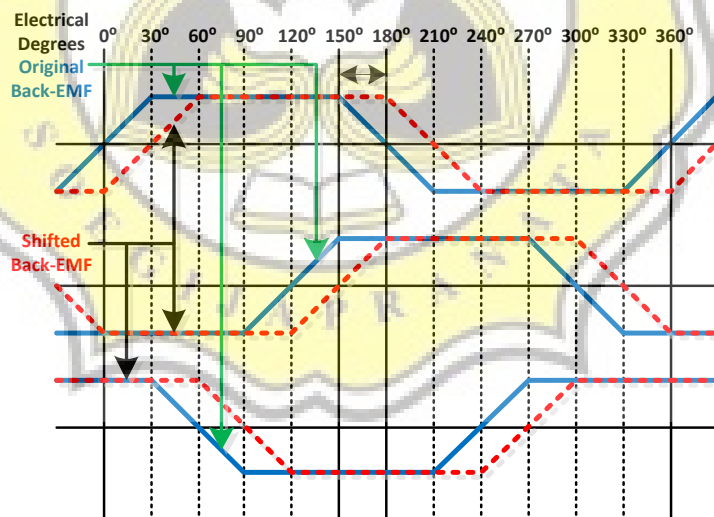
Gambar-3.10. Hubungan antara tiap-tiap saklar konverter dengan BEMF fasa A

Dengan mengacu pada 360° elektrik BEMF trapezoidal, maka saklar S₁ konduksi pada saat 30° – 150°, saklar S₂ konduksi pada 210° – 330°, saklar S₃ konduksi pada 150° – 270°, saklar S₄ konduksi pada 330° – 90°, saklar S₅

konduksi pada $270^\circ - 30^\circ$, dan saklar S_6 konduksi pada $90^\circ - 210^\circ$. Dengan menggunakan fasilitas *input capture* pada mikrokontroler tipe dsPIC30F4012, pola komutasi dengan referensi BEMF tunggal untuk setiap saklar dapat diperoleh.

3.9. Kompensasi Pergeseran Fasa

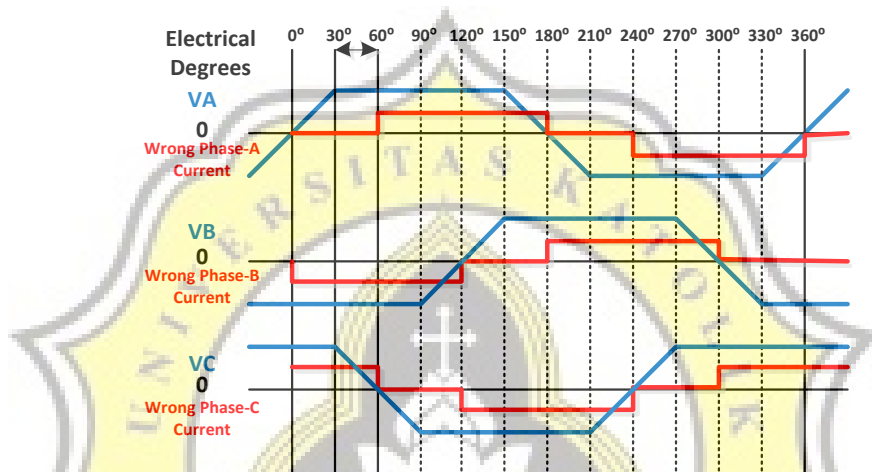
Hubungan antara BEMF dengan sudut komutasi yang tepat dapat di lihat pada Gambar-3.10. Sudut komutasi yang seharusnya dimulai 30 derajat setelah *zero crossing point* menjadi tergeser lebih jauh dikarenakan adanya pengaruh *Low Pass Filter*. Pergeseran yang disebabkan oleh LPF berubah-ubah sesuai dengan kecepatan motor BLDC.



Gambar-3.11. Pergeseran fasa yang disebabkan oleh LPF

Pergeseran fasa yang disebabkan oleh LPF dapat di lihat pada Gambar-3.11. pergeseran ini menyebabkan hasil komutasi yang tidak tepat karena sinyal BEMF yang dihasilkan bergeser dari posisi aslinya. Sebuah metode dibutuhkan

untuk mengkompensasi BEMF agar sinyal komutasi dapat sesuai dengan posisi aslinya, sehingga dapat meningkatkan torka dan memperluas rentang kecepatan. Apabila tidak terkompensasi, BEMF akan menghasilkan sudut komutasi yang tidak tepat. Ilustrasi sudut komutasi yang tidak tepat dapat di lihat pada gambar berikut ini.

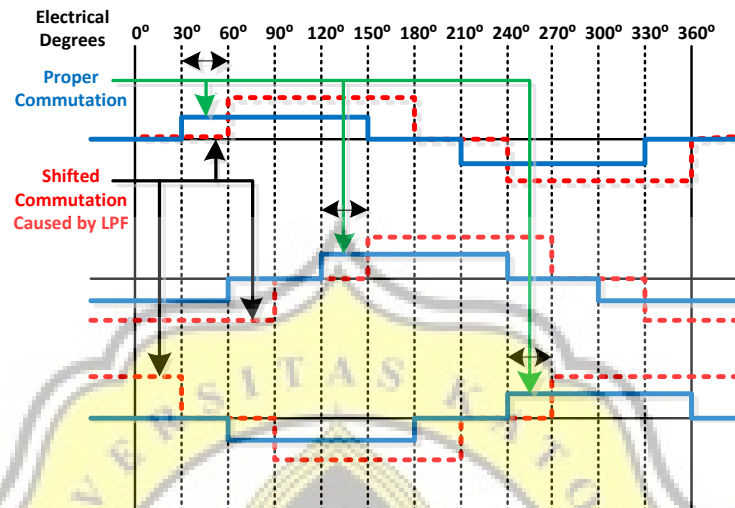


Gambar-3.12. Pergeseran sudut eksitasi sebesar 30° elektrik.

Sudut eksitasi yang tergeser 30° dari yang seharusnya dapat di lihat pada Gambar-3.12. Pergeseran fasa yang disebabkan oleh LPF berubah-ubah sesuai dengan kecepatan motor BLDC. Komutasi yang tidak tepat menyebabkan torka dan rentang kecepatan tidak dapat dimaksimalkan. *Error* yang tidak diinginkan ini sangat mempengaruhi performa motor BLDC. Metode perbaikan fasa dapat diterapkan untuk mengkompensasi *error* ini.

Perbaikan *error* pada pergeseran fasa dapat dilakukan untuk mengkompensasi BEMF yang telah tergeser. Metode ini dapat mengendalikan pergeseran fasa secara bebas, sehingga dapat digunakan untuk memperbaiki sudut

komutasi yang tergeser. Ilustrasi perbaikan pergeseran fasa yang dilakukan untuk mencapai sudut komutasi yang tepat dapat di lihat pada gambar dibawah ini.

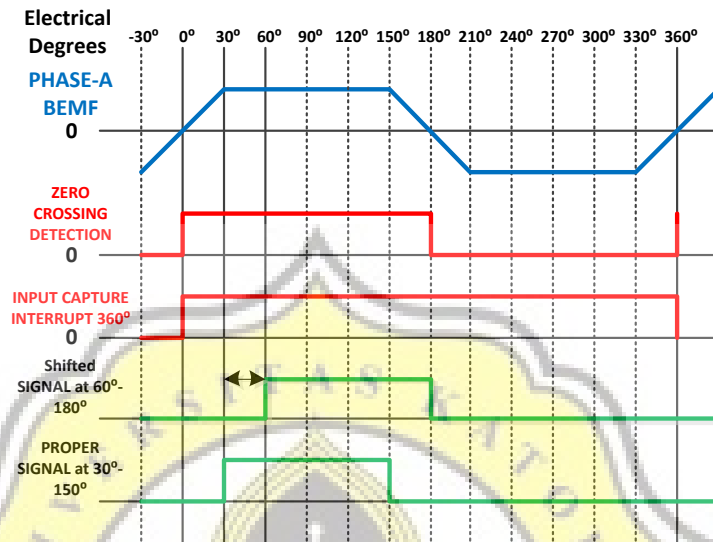


Gambar-3.13. Kompensasi pergeseran fasa.

Sudut komutasi yang telah terkompensasi dapat di lihat pada Gambar-3.13. *Error* yang disebabkan oleh LPF berubah ubah sesuai dengan perubahan kecepatan pada motor BLDC. Metode ini dapat mengkompensasi *error* pada rentang kecepatan rendah hingga kecepatan yang tinggi. Metode ini menggunakan fasilitas *input capture* pada Mikrokontroler dsPIC30F4012. *Input Capture* merupakan fasilitas di dalam dsPIC30F4012 yang berfungsi untuk mengkonversi sinyal digital ke nilai integer. Sinyal digital yang dimaksud di dapat berasal dari *Zero Crossing Detector*.

Zero Crossing Detector mendapatkan sinyal masukan dari sinyal BEMF yang telah tergeser. Keluaran dari *Zero Crossing Detector* juga tergeser menyesuaikan dengan sinyal masukannya. Hubungan antara BEMF dengan *Zero Crossing Detector* dan *Input Capture Interrupt* dapat di lihat pada Gambar-3.14.

Input Capture Interrupt mendeskripsikan 360 derajat elektrik, perioda sinyalnya berubah-ubah sesuai dengan sinyal BEMF.



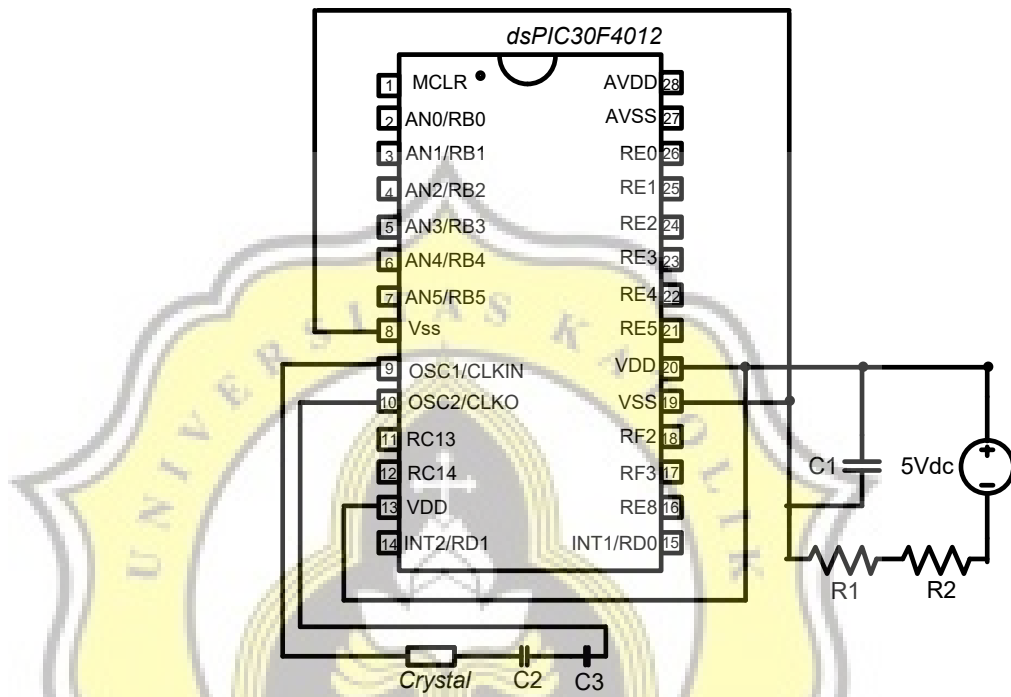
Gambar-3.14. Hubungan antara BEMF dengan ZCD, *Input Capture Interrupt*, *error* komutasi, dan komutasi.

Hubungan antara BEMF dengan ZCD, *Input Capture Interrupt*, *error* komutasi, dan komutasi yang tepat dapat di lihat pada Gambar-3.14. BEMF tanpa riak telah tergeser. Jika sudut komutasi tidak terkompensasi, maka hal tersebut akan sangat berpengaruh pada performa sistem kendali tanpa sensor. Sudut komutasi harus dikompensasi agar menghasilkan kendali yang dapat mengoperasikan motor BLDC pada rentang kecepatan yang lebar. Metode kendali digital yang digunakan untuk mengkompensasi sudut komutasi dijelaskan pada bagian berikut ini.

3.10. Blok Kendali

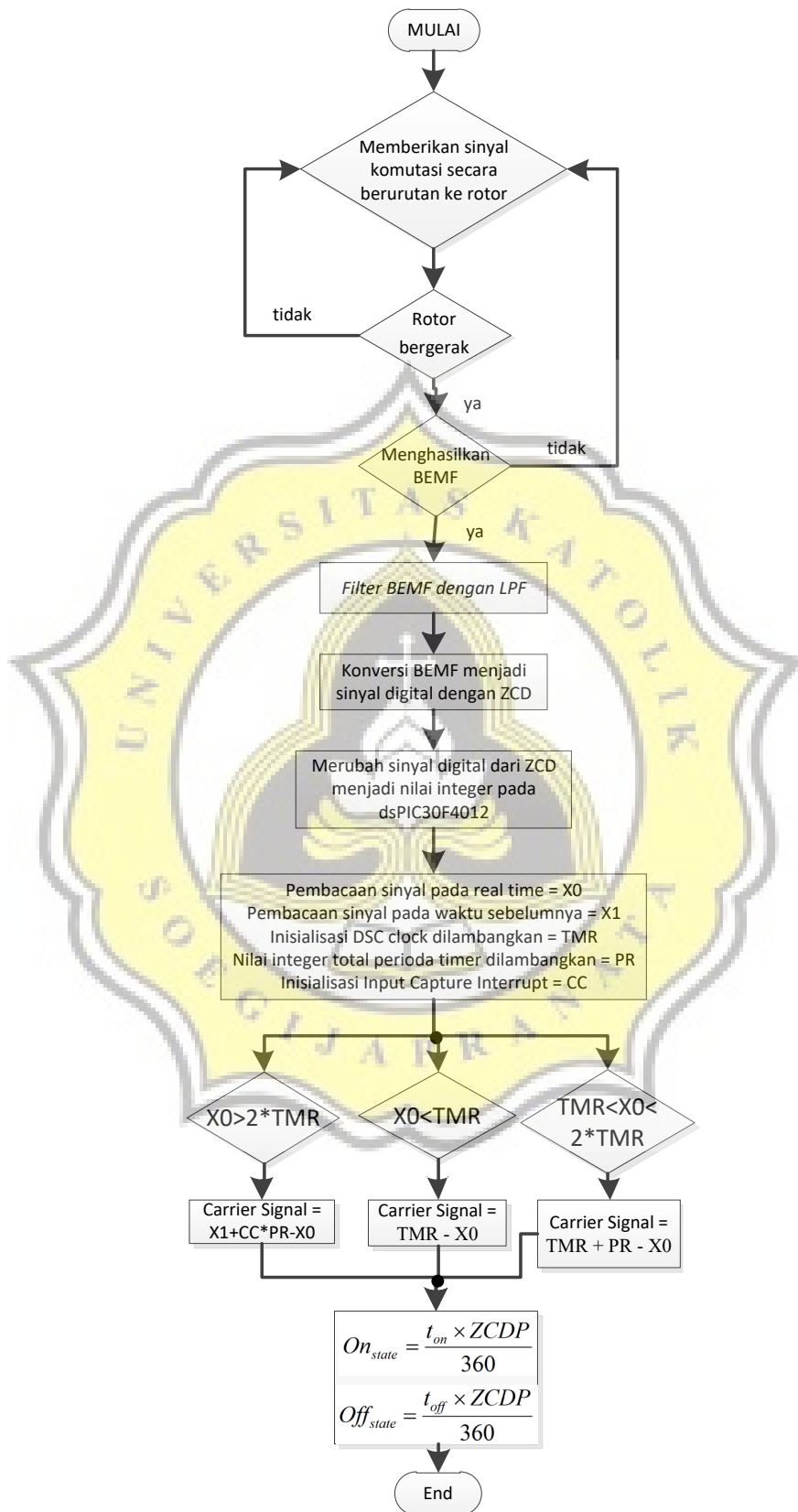
Kontrol yang digunakan pada sistem ini adalah berbasis digital dengan menggunakan mikrokontroler dengan tipe dsPIC30F4012. Mikrokontroler ini

membutuhkan sebuah *system minimum* yang terdiri dari kapasitor dan crystal sebagai pembangkit *clock* untuk operasinya. Rangkaian *system minimum* dari mikrokontroler ini dapat di lihat pada Gambar-3.15.



Gambar-3.15. Rangkaian sistem minimum dsPIC30F4012

Mikrokontroler dengan tipe dsPIC30f4012 termasuk mikrokontroler yang memiliki lebar data 16-bit dan dilengkapi dengan pengaturan 30 MIPS instruksi. Mikrokontroler dsPIC30F4012 merupakan buatan dari perusahaan *Microchip Technology*. Mikrokontroler jenis ini sangat cocok untuk dijadikan basis kendali tanpa sensor motor BLDC karena kecepatan pengolahan datanya yang tinggi. *Flow chart* pemrograman kendali tanpa sensor dapat di lihat pada Gambar-3.16.



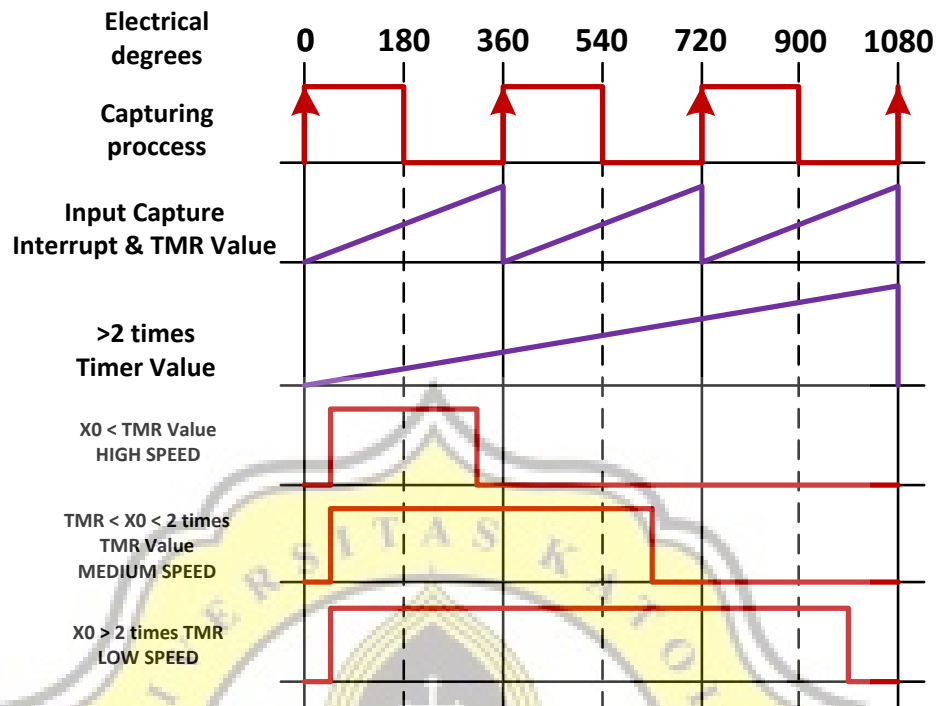
Gambar-3.16. Flow Chart kendali tanpa sensor untuk memperluas rentang kecepatan

Flow chart pengolahan sinyal pada keseluruhan sistem dapat di lihat pada Gambar-3.16. Ketika rotor mulai berputar, di setiap langkah komutasi pasti menyisakan satu fasa yang tidak terkonduksi. Fasa ini sedang dalam kondisi *floating* dan menghasilkan BEMF. BEMF yang dihasilkan masih mengandung komponen frekuensi tinggi / riak. Kemudian sinyal menuju ke *Low Pass Filter*, saat melewati langkah inilah sinyal bergeser fasa. Kemudian sinyal diproses dan diubah ke bentuk sinyal digital oleh ZCD (*Zero Crossing Detector*). Sinyal digital yang dihasilkan oleh ZCD memiliki perioda yang sama dengan BEMF, ia merepresentasikan 360 derajat elektrik. Sinyal dari ZCD tersambung ke *Input Capture* pin pada dsPIC30F4012. Sinyal digital diproses oleh *Input Capture* dan diubah ke nilai integer. Untuk mendapatkan sudut komutasi yang tepat, nilai integer yang masuk pada Mikrokontroler harus dihitung dengan persamaan dibawah ini.

$$ON_{state} = \frac{t_{on} \times ZCDP}{360} \quad (3.1)$$

$$OFF_{state} = \frac{t_{off} \times ZCDP}{360} \quad (3.2)$$

ON_{state} merupakan titik awal pada sudut komutasi dan OFF_{state} merupakan titik akhir pada sudut komutasi. ZCDP merupakan hasil dari nilai integer yang diolah oleh *Input Capture* dengan referensi satu perioda sinyal dari *Zero Crossing Detector*. Namun, sebelum masuk ke persamaan ini, algoritma tambahan dibutuhkan. Algoritma yang diperlukan berbeda-beda sesuai dengan frekuensi sinyal masukan atau sesuai dengan kecepatan BLDC. Algoritma pada tiap-tiap kondisi kecepatan dapat di lihat pada Gambar-3.17.



Gambar-3.17. Proses *capturing* oleh *Input Capture*, masukan sinyal kecepatan tinggi, kecepatan sedang, dan kecepatan rendah

Proses *capturing* pada kecepatan rendah hingga tinggi dapat di lihat pada Gambar-3.17. Ada tiga tipe sinyal yang menggambarkan kecepatan motor BLDC yaitu kecepatan tinggi, kecepatan sedang, dan kecepatan rendah. Semakin tinggi frekuensi, semakin tinggi kecepatan motor BLDC. Sinyal masukan secara *real time* direpresentasikan dengan variabel X_0 dan *timer* pada Mikrokontroler direpresentasikan dengan TMR. Kondisi pertama adalah kondisi dimana nilai sinyal masukan lebih sempit daripada nilai TMR ($X_0 < TMR$), kondisi ini merepresentasikan kecepatan tinggi. Kondisi yang kedua adalah kondisi dimana nilai sinyal masukan lebih lebar daripada nilai TMR, namun tidak sampai dua kali nilai TMR ($TMR < X_0 < 2 \text{ times TMR}$), kondisi ini merepresentasikan kecepatan menengah. Kondisi yang terakhir adalah kondisi dimana nilai sinyal masukan lebih dari dua kali nilai TMR ($X_0 > 2 \text{ times TMR}$), kondisi ini merepresentasikan

kecepatan rendah. Penanganan tiap-tiap kondisi berbeda beda, algoritma yang digunakan dapat di lihat pada Gambar-3.17.

Metode ini mampu menghasilkan sudut komutasi yang tepat, sehingga dapat menghasilkan torka yang lebih tinggi dan mampu mengoperasikan motor BLDC pada rentang kecepatan yang luas. Setelah itu perhitungan sudut komutasi dimulai dan dsPIC30F4012 mengeluarkan enam sinyal yang merepresentasikan masing-masing saklar MOSFET. Keluaran dari dsPIC30F4012 port E0 mengendalikan MOSFET S₁, port E1 mengendalikan MOSFET S₂, port E2 mengendalikan MOSFET S₃, port E3 mengendalikan MOSFET S₄, port E4 mengendalikan MOSFET S₅, port E5 mengendalikan MOSFET S₆. Hasil keluaran dari pola komutasi dibahas pada BAB IV berikut ini.

