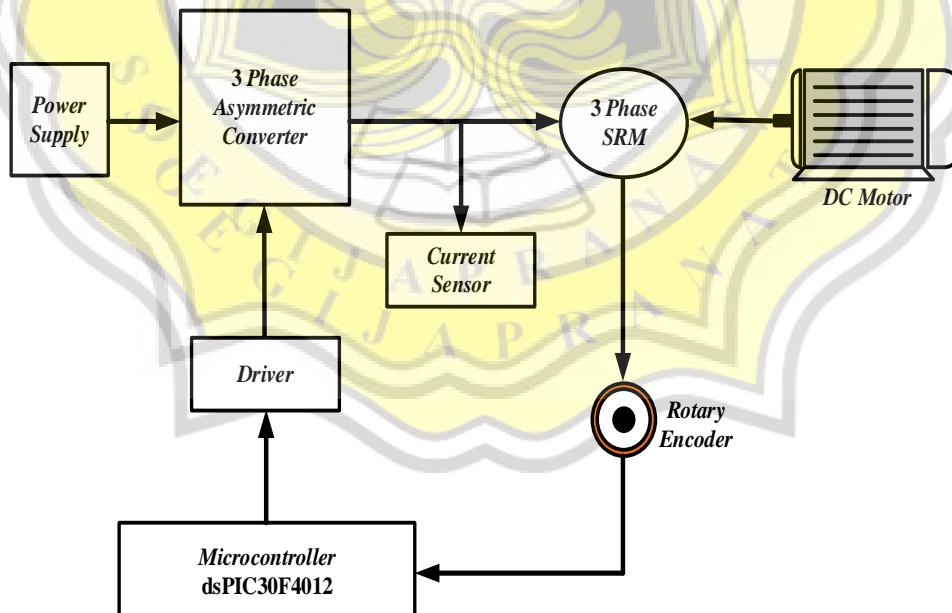


BAB III

DESAIN RANCANGAN DAN IMPLEMENTASI METODE KONTROL PENEREMAN REGENERATIF PADA SRM

3.1 Pendahuluan

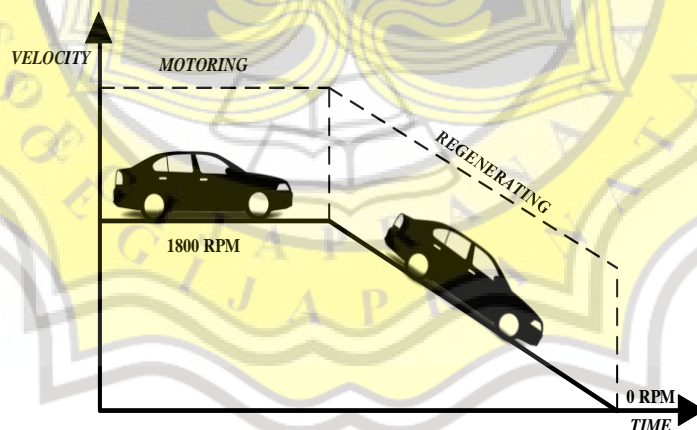
Pada bab ini menampilkan pembahasan tentang metode-metode kontrol pengereman regeneratif pada *Switched Reluctance Machine* (SRM). Disajikan pula rangkaian pendukung yang digunakan antara lain yaitu rangkaian kendali SRM, rangkaian konverter *asymmetric* 3 fasa, rangkaian sensor arus LEM LA 50-P, rangkaian *isolated power supply* DC-DC, rangkaian *driver* TLP 250, dan konsep pengereman regeneratif pada SRM. Skema kendali pada SRM yang disajikan pada Gambar-3.1.



Gambar-3. 1 Skema kendali pada SRM

3.2 Konsep Pengereman Regeneratif pada SRM

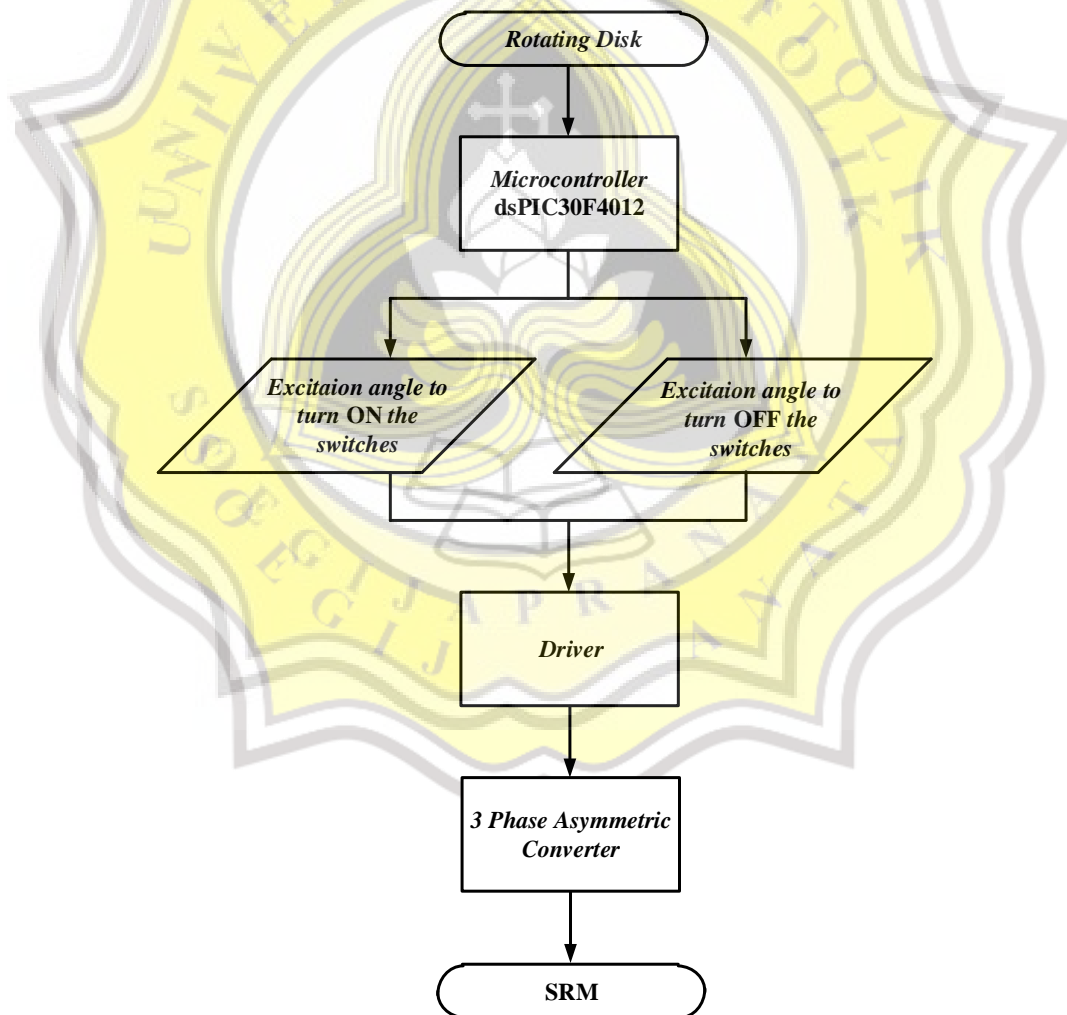
Switched Reluctance Machine (SRM) dapat dioperasikan pada dua kondisi yaitu sebagai motor dan generator. Pengereman regeneratif dibutuhkan untuk meminimalisir energi yang terbuang pada pengereman konvensional sehingga energi yang terbuang dapat dimanfaatkan untuk pengisian baterai. Pengereman regeneratif pada SRM memanfaatkan torka negatif pada rotor ketika menjauh dari belitan stator. Pada pengereman regeneratif SRM menggunakan dua metode operasi. Metode pertama menggunakan *single-pulse* diimplementasikan pada kondisi motor kecepatan tinggi. Metode kedua menggunakan *PWM control* diimplementasikan pada kondisi motor kecepatan rendah. Metode *PWM control* terdiri dari mode operasi yaitu *magnetizing-freewheeling* dan *magnetizing-demagnetizing*. Pada pengujian ini menggunakan variasi kecepatan yaitu kecepatan 1800 RPM, 1500 RPM, dan 1200 RPM.



Gambar-3. 2 Konsep pengereman regeneratif

Pengisian baterai dapat dilakukan selama pengereman regeneratif sehingga dapat meningkatkan jarak tempuh kendaraan. Ada kondisi tiga kecepatan di SRM, antara lain: saat SRM berada pada kecepatan maksimum, nilai torka pada kondisi

nominal. Sehingga metode *single-pulse* dapat diterapkan, karena menghasilkan efisiensi tinggi yang menguntungkan [12]. Jika dibawah nilai kecepatan maksimum, torka motor dapat dijaga relatif konstan. Sedangkan pada kondisi kecepatan rendah, nilai torka menjadi kecil. Untuk mengatasi kondisi ini, pengaturan dapat dilakukan dengan menggunakan teknik PWM, metode yang digunakan yaitu *PWM control*. Pada kondisi ini dibutuhkan peningkatan torka negatif diperlukan. Mode operasi ini menggunakan prinsip kerja *chopper boost*. Konsep pengereman regeneratif disajikan pada Gambar-3.2.



Gambar-3. 3 Flowchart dari proses pengereman regeneratif

Proses metode input capture dimulai dari putaran piringan yang di sensor *rotary encoder* E50S8-2500-3-V-5 menjadi sinyal referensi digital. Sinyal referensi dikirimkan dan diproses oleh mikrokontroler dsPIC30F4012. Setelah dari mikrokontroler maka perlu menentukan sudut eksitasi (θ_{eks}) untuk menyalakan saklar dan mematikan saklar. Mikrokontroler dsPIC30F4012 akan mengirimkan sinyal perintah ke *driver* dan menentukan kondisi saklar pada konverter *asymmetric*. Kondisi saklar yang ditentukan konverter *asymmetric* memberikan eksitasi untuk mengoperasikan *Switched Reluctance Machine* (SRM). Penentuan saklar hidup (ON) dan saklar mati (OFF) dapat dinyatakan dengan (3-1) dan (3-2). *Flowchart* dari proses pengereman regeneratif disajikan pada Gambar-3.3.

$$ON = \frac{ON_{deg} * INC_{capt}}{360} \quad (3-1)$$

$$OFF = \frac{OFF_{deg} * INC_{capt}}{360} \quad (3-2)$$

di mana :

ON = Kondisi saklar aktif

OFF = Kondisi saklar mati

ON_{deg} = Sudut untuk mengaktifkan saklar

OFF_{deg} = Sudut untuk mematikan saklar

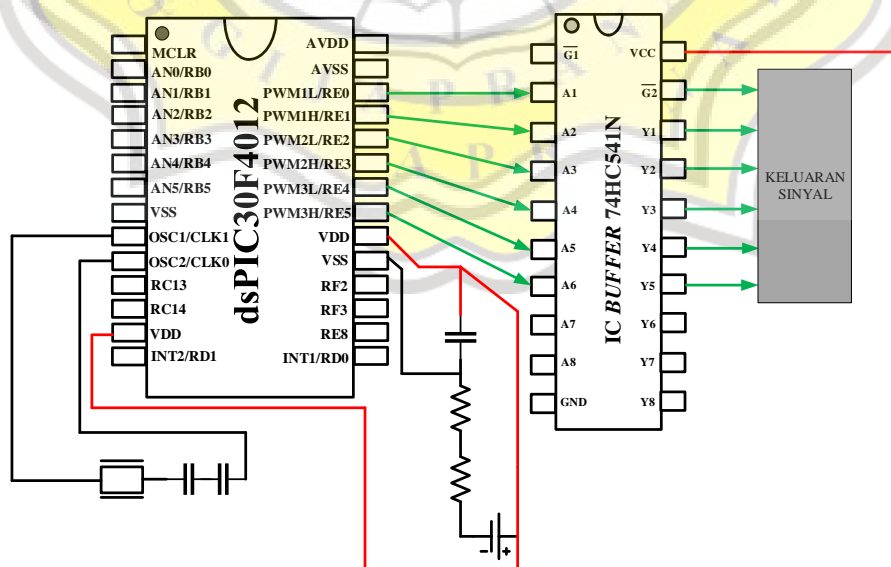
INC_{capt} = *Input capture*

3.3 Rangkaian Kendali pada SRM

Rangkaian kendali pada SRM berfungsi untuk mengontrol kinerja SRM supaya mampu beroperasi pada kondisi yang diinginkan. Pada rangkaian kendali

mencakup antara lain yaitu IC *buffer* 74HC541N dan mikrokontroler dsPIC30F4012. Mikrokontroler dsPIC30F4012 beroperasi dengan membangkitkan *clock* eksternal sebagai sistem *minimum*, maka diperlukan kapasitor dan kristal. Mikrokontroler tipe ini memiliki keunggulan instruksi sebesar 30 MIPS (*Mega Instruction per Second*) dan 16-Bit. Sinyal mikrokontroler dibangkitkan untuk proses pensaklaran IGBT pada konverter *asymmetric* selanjutnya diteruskan menuju IC *buffer* 74HC541N. IC *buffer* 74HC541N berfungsi sebagai komponen yang menjaga kestabilan tegangan hingga sampai rangkaian *driver* dan rangkaian daya agar tidak terjadi *voltage drop*. Pada bagian pemrograman mikrokontroler dsPIC30F4012 membutuhkan *software* pendukung yaitu *software* mikroC PRO for dsPIC dengan bahasa pemrograman C. *Wiring* mikrokontroler dsPIC30F4012 ke IC *buffer* 74HC541N disajikan pada Gambar-3.4.

Pada *compiler* mikrokontroler dsPIC30F4012 mempunyai fitur *library* yang cukup membantu dalam proses pemrograman yaitu ADC (*Analog to Digital Converter*), PWM (*Pulse Width Modulation*), dan LCD (*Liquid Crystal Display*).



Gambar-3. 4 *Wiring* mikrokontroler dsPIC30F4012 ke IC *buffer* 74HC541N

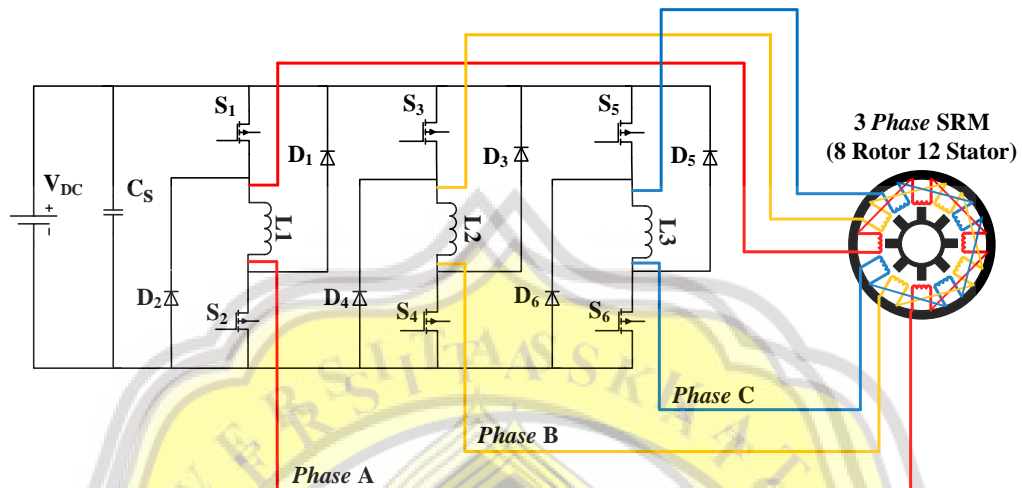
Konfigurasi pin mikrokontroler dsPIC30F4012 :

- AVDD berfungsi untuk suplai positif untuk ADC (*Analog to Digital Converter*).
- AVSS berfungsi untuk *ground* untuk modul ADC (*Analog to Digital Converter*).
- MCLR berfungsi untuk mereset *digital* sinyal kontroler.
- AN0 - AN5 / RB0 - RB5 (PORT B) berfungsi sebagai input ADC sesuai pada *channel* yang digunakan.
- RE0 - RE5 (PORT E) berfungsi sebagai pin I/O.
- VDD berfungsi sebagai suplai positif logika dan pin I/O.
- VSS berfungsi sebagai untuk *ground* logika dan pin I/O.
- OSC1 - OSC2 / CLKIN – CLK0 berfungsi sebagai *input external clock* dan selalu terhubung dengan pin *oscillator crystal*.
- RC13 - RC14 (PORT C) berfungsi sebagai pin I/O.
- RF2 - RF3 (PORT F) berfungsi sebagai pin I/O.
- INT2 - INT1 / RD1 - RD0 (PORT D) berfungsi sebagai pin I/O.

3.4 Rangkaian Konverter *Asymmetric* 3 Fasa SRM

Rangkaian konverter *asymmetric* 3 fasa berfungsi untuk mengatur proses *switching* pada IGBT Semikron SKM 40GD123D. IGBT tipe Semikron SKM 40GD123D tersebut terdapat enam buah IGBT sebagai saklar statis dan enam buah sebagai dioda yang terbagi menjadi tiga lengan terhubung dengan stator SRM. Pada pengoperasian SRM, mikrokontroler dsPIC30F4012 membutuhkan rangkaian *driver* untuk mengoperasikan kinerja IGBT yang diberikan pulsa pada bagian *Gate*.

Ketika IGBT mendapatkan masukan sinyal *switching* dari rangkaian kendali yang telah diprogram, maka selanjutnya diproses dan diteruskan ke tiap fasa SRM.

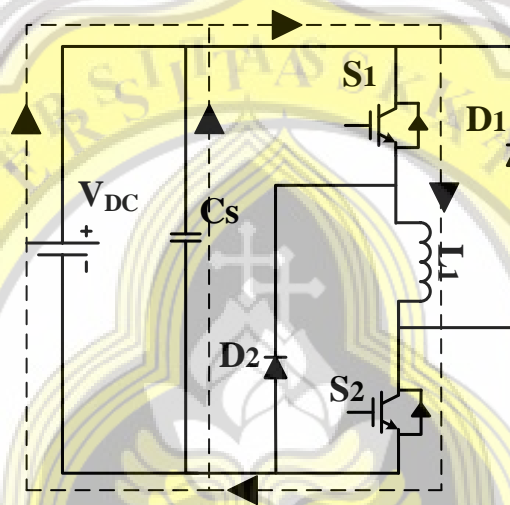


Gambar-3. 5 Konverter *asymmetric* 3 fasa SRM

Gambar-3.5 disajikan konverter *asymmetric* 3 SRM dengan menunjukkan S_1 - S_6 merupakan saklar statis menggunakan IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) dan D_1 - D_6 merupakan dioda *freewheeling*. Saklar statis dihubungkan secara seri (L_1 , L_2 , L_3). Pada setiap lengan konverter *asymmetric* 3 fasa dikontrol secara independen, oleh karena itu konverter ini meminimalisir adanya *short circuit*. Ketika dua saklar dalam satu fase dioperasikan secara bersamaan arus dari baterai mengalir ke belitan stator, dan motor menyerap energi dari sumbernya.

Konverter asimetris dapat beroperasi dalam tiga mode kerja: *magnetizing*, *freewheeling*, dan *demagnetizing*. Pemilihan konverter *asymmetric* mengurangi tegangan riak saklar statis, sehingga meningkatkan efisiensi daya. SRM dapat dioperasikan dalam berbagai variasi kecepatan. Pengaturan arus melalui pengaturan tegangan merupakan suatu cara untuk mengatur kecepatan putaran motor SRM [13].

SRM memiliki dua mode operasi: kontrol *single-pulse* dan PWM control. Metode operasi PWM control termasuk mode *magnetizing-freewheeling* dan *magnetizing-demagnetizing*. Penggunaan metode operasi *single-pulse* diterapkan secara efisien pada operasi motor pada kecepatan 1800 RPM. Sedangkan pengoperasian motor pada kecepatan 1200 RPM menggunakan metode PWM control [14].



Gambar-3. 6 Mode Magnetizing

$$V_{DC} = R \cdot i_{phase} + L \frac{di}{dt} i_{phase} + e \quad (3-3)$$

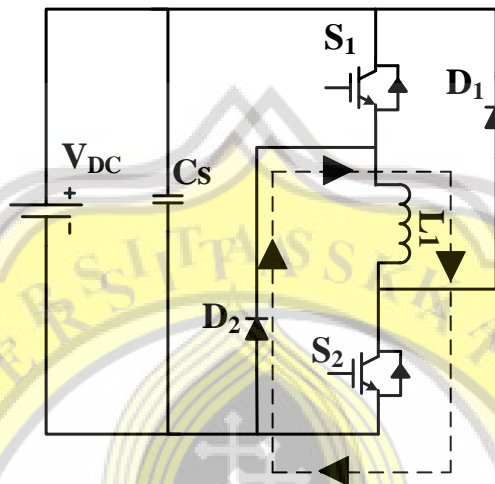
Tabel-3. 1 Pensaklaran menggunakan mode magnetizing

Phase	S1	S2	S3	S4	S5	S6
A	High	High	Low	Low	Low	Low
B	Low	Low	High	High	Low	Low
C	Low	Low	Low	Low	High	High

Pada Gambar-3.6. ditunjukkan bahwa mode kerja *magnetizing* memberikan upaya untuk menginjeksikan arus (eksitasi) pada belitan stator untuk menciptakan medan magnet antara rotor dan belitan stator. Pada kondisi ini, kedua saklar

dioperasikan secara bersamaan seperti yang ditunjukkan pada Tabel-3.1.

Persamaan tegangan pada mode operasi *magnetizing* dinyatakan dalam (3-3)



Gambar-3. 7 Mode *Freewheeling*

$$0 = R \cdot i_{phase} + L \frac{di}{dt} i_{phase} + e \quad (3-4)$$

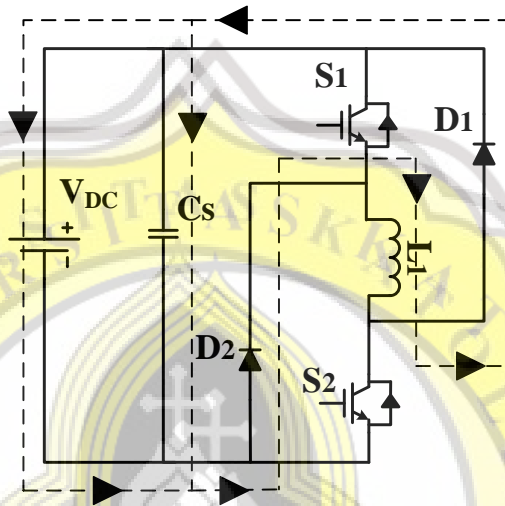
$$\frac{d}{dt} i_{phase} = -\frac{e}{L} \quad (3-5)$$

Tabel-3. 2 Pensaklaran menggunakan mode *freewheeling*

<i>Phase</i>	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	<i>S4</i>	<i>S5</i>	<i>S6</i>
<i>A</i>	<i>High</i>	<i>Chopping</i>	<i>Low</i>	<i>Low</i>	<i>Low</i>	<i>Low</i>
<i>B</i>	<i>Low</i>	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>Chopping</i>	<i>Low</i>	<i>Low</i>
<i>C</i>	<i>Low</i>	<i>Low</i>	<i>Low</i>	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>Chopping</i>

Pada Gambar-3.7. hasil dari mode kerja *freewheeling* adalah tegangan pada belitan bernilai nol, sehingga arus pada belitan stator cenderung menurun secara perlahan [15]. Karena tegangan pada belitan adalah nol, maka kondisi ini hanya satu saklar yang dioperasikan dan saklar lainnya dimatikan seperti yang ditunjukkan pada Tabel-3.2.

Dalam mode *freewheeling*, sirkuit tertutup diterapkan untuk menghilangkan arus yang tersimpan dalam belitan stator seperti yang dinyatakan pada persamaan (3-4). Ketika arus fasa berkurang secara perlahan dengan kemiringan tertentu maka akan dapat diperoleh persamaan (3-5)



Gambar-3. 8 Mode *Demagnetizing*

Pada Gambar-3.8. menunjukkan mode kerja *demagnetizing*. Mode ini beroperasi setelah mode *magnetizing*. Dalam mode kerja ini, kedua saklar dioperasikan dengan cara mematikan secara bersamaan [16]. Sehingga arus yang tersimpan pada belitan stator dapat mengalir ke baterai melalui dioda, seperti terlihat pada Tabel-3.3. Persamaan tegangan dalam *demagnetizing* dinyatakan dalam (3-6)

$$-V_{DC} = L \frac{di}{dt} i_{phase} + e + R \cdot i_{phase} \quad (3-6)$$

Tabel-3. 3 Pensaklaran menggunakan mode *demagnetizing*

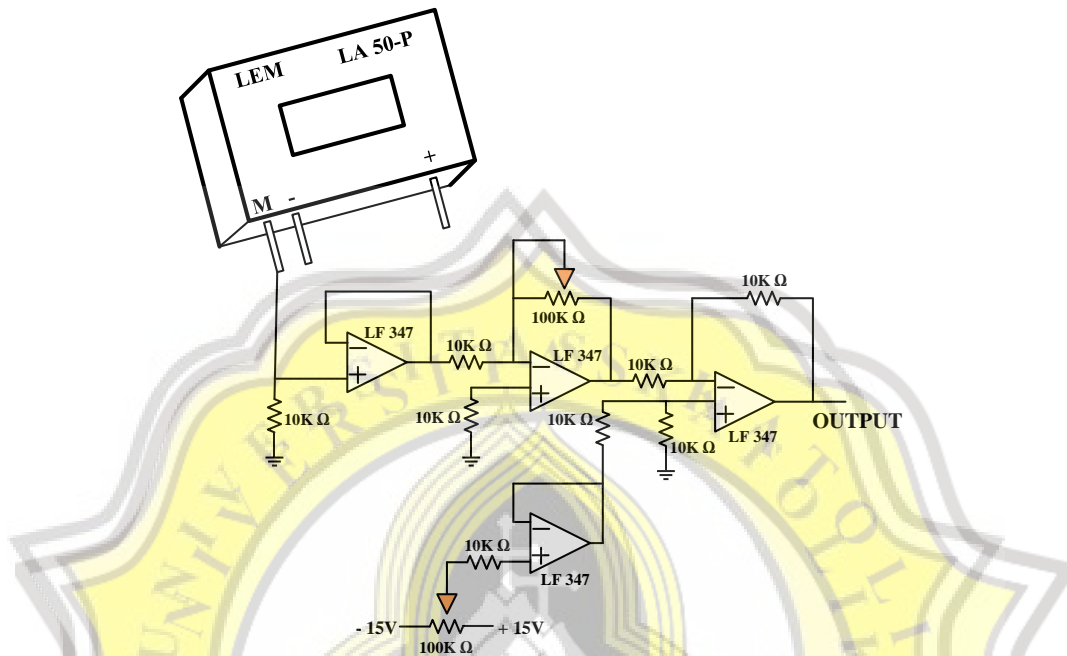
Phase	S1	S2	S3	S4	S5	S6
A	<i>Chopping</i>	<i>Chopping</i>	<i>Low</i>	<i>Low</i>	<i>Low</i>	<i>Low</i>
B	<i>Low</i>	<i>Low</i>	<i>Chopping</i>	<i>Chopping</i>	<i>Low</i>	<i>Low</i>
C	<i>Low</i>	<i>Low</i>	<i>Low</i>	<i>Low</i>	<i>Chopping</i>	<i>Chopping</i>

3.5 Rangkaian Sensor Arus LEM LA 50-P

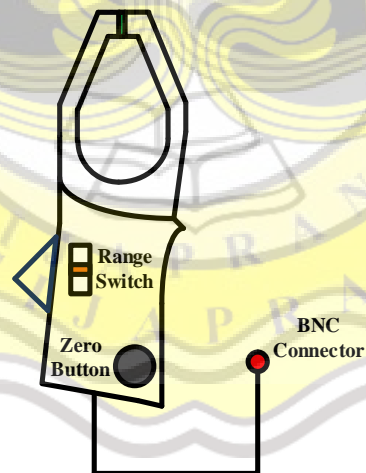
Rangkaian sensor arus adalah rangkaian yang mendukung dalam proses kinerja SRM pada hal ini untuk mendapatkan hasil keluaran arus setiap fasa. Rangkaian sensor arus mencakup beberapa komponen pendukung antara lain yaitu sensor arus LEM LA 50-P, resistor 10k ohm, potensiometer 100k ohm, dan IC LF347. Rangkaian sensor arus LEM LA 50-P dapat membaca arus hingga 50A dengan catu daya +15 V, *ground*, dan -15 V. Pada rangkaian sensor arus ini diberikan tambahan rangkaian penguat sinyal berupa OP-AMP, yang mana berfungsi sebagai penguat sinyal agar mudah dalam pembacaan nilai arus, mengatur *gain*, mengatur *dc offset*, dan tegangan keluaran sensor [17]. Rangkaian sensor arus LEM LA 50-P yang disajikan pada Gambar-3.9.

Untuk pembacaan hasil keluaran arus maka diperlukan osiloskop digital dan sensor arus *clamp*. Sensor arus *clamp* atau tang *ampere* merupakan salah satu jenis sensor arus yang berfungsi untuk mengukur arus yang mengalir pada sebuah kabel tanpa harus memutus *circuit* arus. Pada penelitian ini memilih sensor arus *clamp* merek Hantek CC-65 sebagai sensor pendukung. Sensor arus *clamp* Hantek CC-65 mampu mengukur arus 0-65A pada frekuensi 20KHz. Selain itu kelebihan sensor arus *clamp* ini mampu mengukur arus DC dan AC [18]. Untuk mengetahui hasil

pembacaan keluaran arus, maka sensor arus *clamp* akan disambungkan ke osiloskop digital. Sensor arus *clamp* yang disajikan pada Gambar-3.10.



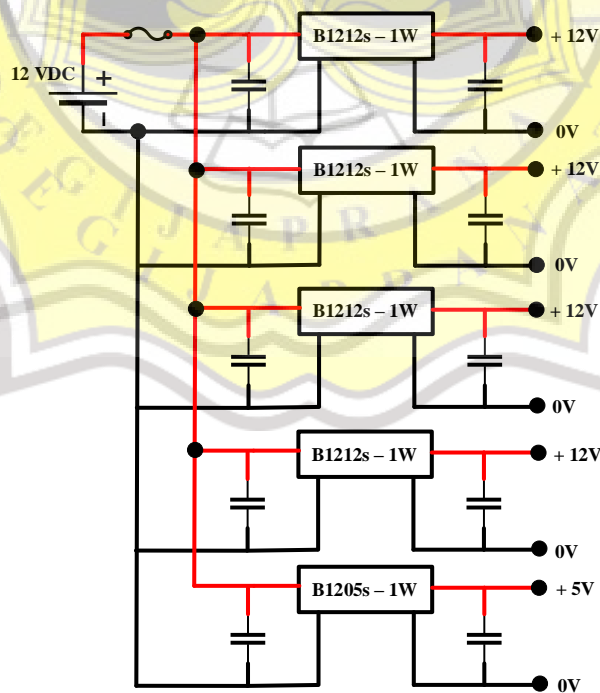
Gambar-3. 9 Rangkaian sensor arus LEM LA 50-P



Gambar-3. 10 Sensor arus clamp

3.6 Rangkaian *Isolated Power Supply DC-DC*

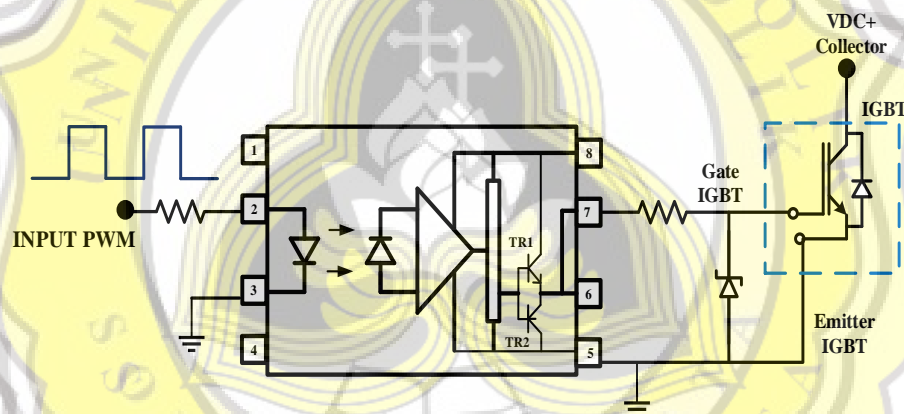
Rangkaian *isolated power supply* DC-DC merupakan rangkaian pendukung untuk mensuplai daya pada rangkaian *driver* dan rangkaian kendali [19]. Rangkaian ini mampu menghasilkan tegangan keluaran 12VDC yang mana dihasilkan dari komponen B1212s-1W dan juga menghasilkan tegangan keluaran 5VDC dari komponen B1205s-1W. Rangkaian *isolated power supply* DC-DC terdiri dari komponen B1212s-1W dan B1205s-1W yang mana fungsi dari kedua komponen sebagai catu daya yang nilai keluaran tegangan dapat disesuaikan (12VDC/5VDC). *Fuse* berfungsi sebagai pengaman apabila terjadi konsleting, kapasitor polar berfungsi untuk mempertahankan tegangan agar tetap stabil pada *power supply*. *Grounding* pada tegangan masukan dan tegangan keluaran berbeda, maka dari itu hanya membutuhkan satu sumber DC saja. Skema rangkaian *isolated power supply* DC-DC disajikan pada Gambar-3.11.



Gambar-3. 11 Skema rangkaian *isolated power supply* DC-DC

3.7 Rangkaian Driver TLP 250

Rangkaian *driver* adalah rangkaian yang digunakan pada SRM di dalamnya terdapat komponen *photoelectric coupler*. Rangkaian *driver* berfungsi sebagai penghubung antara mikrokontroler dsPIC30F4012 yang beroperasi pada arus dan tegangan kecil dengan rangkaian daya yang beroperasi pada arus dan tegangan besar [20]. Rangkaian *driver* ini menggunakan tipe *photoelectric coupler* berjenis TLP 250. TLP 250 mampu memberikan pengaman apabila terjadi *short circuit* pada rangkaian daya. Suplai tegangan yang dibutuhkan *photoelectric coupler* TLP 250 yaitu 12V.



Gambar-3. 12 Rangkaian *driver* menggunakan *photoelectric coupler* TLP 250

Fungsi utama dari rangkaian *driver* pada SRM adalah menyalakan IGBT sesuai dengan perintah mikrokontroler dsPIC30F4012. Pada bagian sinyal masukan TLP 250 berupa sinyal digital yaitu logika 1 (*High*) atau logika 0 (*Low*). Adapun logika berdasarkan prinsip kerja tegangan pada mikrokontroler, apabila mikrokontroler mempunyai nilai tegangan kerja 5VDC maka logika 1 (*High*) akan membangkitkan nilai tegangan 5VDC. Pada kondisi logika 0 (*Low*), maka mikrokontroler tidak akan ada proses pembangkitan nilai tegangan atau 0VDC. Pin

7 dan 8 dapat digunakan bersamaan untuk kedua saklar dengan *ground* yang sama [21]. Rangkaian *driver* menggunakan tipe *photoelectric coupler* berjenis TLP 250 disajikan pada Gambar-3.12.

