

BAB III

RANCANGAN KENDALI Pengereman REGENERATIF DENGAN PULSA TUNGGAL

3.1 Pendahuluan

Pada Bab ini menguraikan mengenai perancangan kendali pada pengereman regeneratif dengan metode pensaklaran pulsa tunggal yang diterapkan pada *Switched Reluctance Machine* (SRM). Disajikan pula konstruksi pada SRM yang digunakan, beberapa rangkaian tambahan seperti rangkaian kendali, rangkaian konverter, rangkaian catu daya dan komponen tambahan yang beroperasi pada sistem pengereman regeneratif.

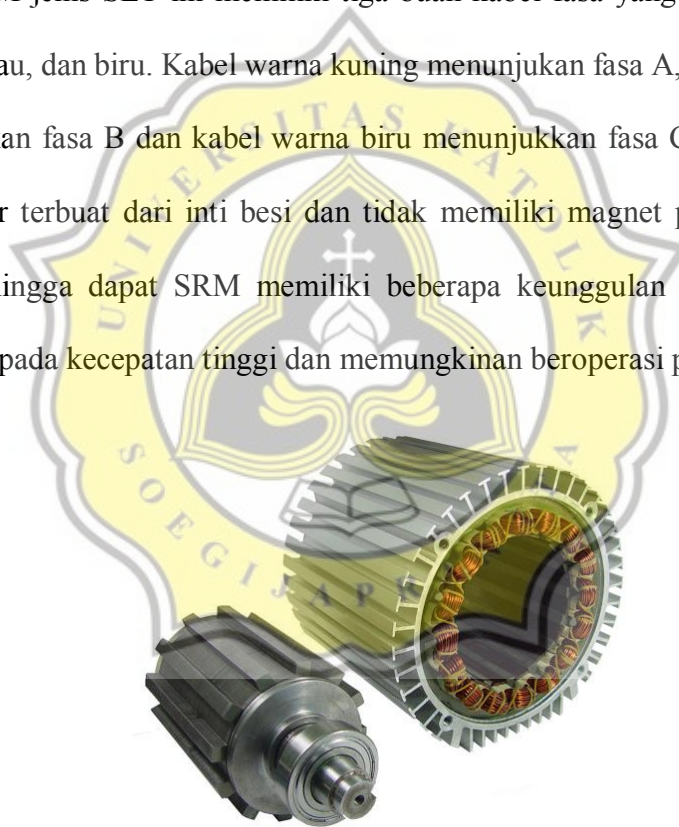
3.2 Konstruksi *Switched Reluctance Machine*

SRM yang digunakan pada pengujian *prototype* adalah jenis SLT yang mempunyai 12 stator dan 8 rotor. SRM ini memiliki tiga buah *hall effect* yang terpasang di sekitar rotor dengan jarak 120 derajat elektrik. Mesin ini juga dapat beroperasi pada kecepatan rendah hingga kecepatan tinggi sesuai dengan spesifikasi SRM yang disajikan pada Tabel-3.1.

Tabel-3. 1 Spesifikasi SRM jenis SLT.

Model	SRM jenis SLT
Daya	1200 W
Nilai Tegangan Maksimum	60 Volt
Nilai Kecepatan rata-rata	4800 Rpm
Nilai Kecepatan Maksimum	10.000 Rpm
Nilai Arus Maksimum	35 Ampere

SRM jenis SLT ini memiliki tiga buah kabel fasa yang terdiri dari warna kuning, hijau, dan biru. Kabel warna kuning menunjukkan fasa A, kabel warna hijau menunjukkan fasa B dan kabel warna biru menunjukkan fasa C. Pada konstruksi SRM, rotor terbuat dari inti besi dan tidak memiliki magnet permanen ataupun belitan sehingga dapat SRM memiliki beberapa keunggulan diantaranya dapat beroperasi pada kecepatan tinggi dan memungkinkan beroperasi pada suhu tinggi.



Gambar-3. 1 Bentuk fisik stator dan rotor SRM

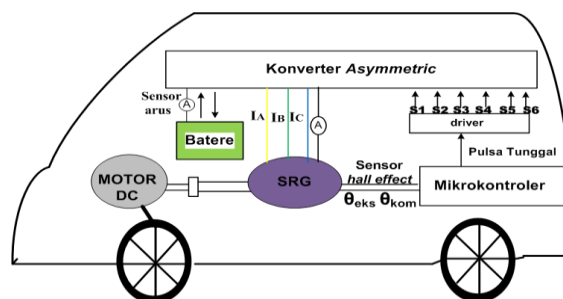
(<http://kaskod.ee/technology/switched-reluctance-motor-generator-technology/>)

Pada Gambar-3.1. ditunjukkan bentuk fisik dari stator dan rotor pada SRM. Konstruksi pada SRM memiliki kutub yang menonjol sehingga termasuk karakteristik magnetik non linier. Karakteristik pada SRM termasuk kategori mesin

non linier karena tidak ada medan magnet disekitar rotor dan stator. Untuk itu, diperlukan injeksi arus pada belitan stator untuk menginduksi rotor. pemberian arus pada belitan stator dengan cara menentukan pola pensaklaran yang dihasilkan pada rangkaian konverter.

3.3 Prinsip Kerja Pengereman Regeneratif *Switched Reluctance Machine*

Pengereman regeneratif merupakan pengereman yang memanfaatkan energi yang terbuang akibat pengereman konvensional untuk pengisian daya ke sumber batere[4]. Pengereman regeneratif sangat sesuai diaplikasikan pada kendaraan listrik karena memiliki beberapa keuntungan diantaranya dapat memperpanjang jarak tempuh dan meningkatkan efisiensi dari kinerja mesin listrik yang digunakan. Pengereman regeneratif dapat diaplikasikan pada SRM menggunakan konverter *Asymmetric*. Metode pensaklaran pada konverter *Asymmetric* pada sistem pengereman regenerative yaitu salah satunya adalah metode pensaklaran pulsa tunggal. Metode ini menggunakan nilai sudut yang sesuai untuk menghasilkan pengereman regeneratif yang optimal untuk memperjelas sistem disajikan diagram blok yang ditunjukkan pada Gambar-3.2.



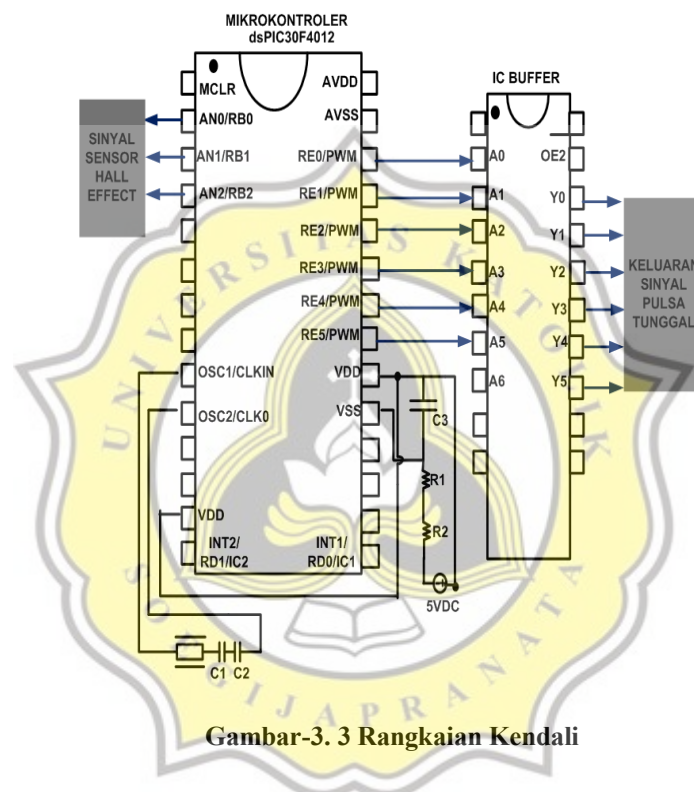
Gambar-3. 2 Diagram blok sistem yang diterapkan pada kendaraan listrik.

Langkah awal yaitu motor DC diputar sebagai energi kinetik untuk menggerakkan roda. Putaran dari motor DC akan menggerakkan rotor SRM. Putaran dari rotor SRM berpengaruh pada sensor *hall effect* yang terletak diantara stator dan rotor. Sensor *hall effect* mengirimkan sinyal berupa PWM pada mikrokontroler dsPIC30F4012 dan akan diolah untuk mengaktifkan fasilitas *Input Capture* pada mikrokontroler tersebut. Sinyal dari *Input Capture* digunakan untuk menentukan nilai θ_{eks} dan θ_{kom} yang lebih presisi. Penyalaan θ_{eks} dan θ_{kom} menghasilkan pola pensaklaran pulsa tunggal. Pengiriman arus pada stator dilakukan dengan cara memberikan sinyal pensaklaran berupa θ_{eks} dan θ_{kom} pada posisi induktansi minimum. Sinyal saklar akan diteruskan ke *Driver* dan rangkaian daya sehingga terjadi peningkatan arus fasa. Setelah pemadaman saklar pada stator terjadi penurunan fasa. Pengaruh perubahan sudut eksitasi yang terjadi dapat dilihat dari keluaran sensor arus yang diletakkan diantara konverter dan salah satu belitan SRM. Pada bagian sumber batere juga dipasang sensor arus untuk mengetahui bentuk arus pada batere saat *charging* dan *discharging*.

3.4 Blok Rangkaian Kendali

Rangkaian kendali berfungsi untuk mengendalikan mesin- mesin listrik agar dapat beroperasi sesuai yang diinginkan. Rangkaian kendali terdiri dari rangkaian mikrokontroler dan *buffer*. IC yang digunakan pada rangkaian mikrokontroler yakni tipe dsPIC30F4012 yang memiliki keunggulan diantaranya yaitu memiliki 16-Bit dengan variasi diatas 30 MIPS yang mengintegrasikan *peripheral* SMPS, *peripheral motoric* dan pengaman kode program yang memungkinkan konverter

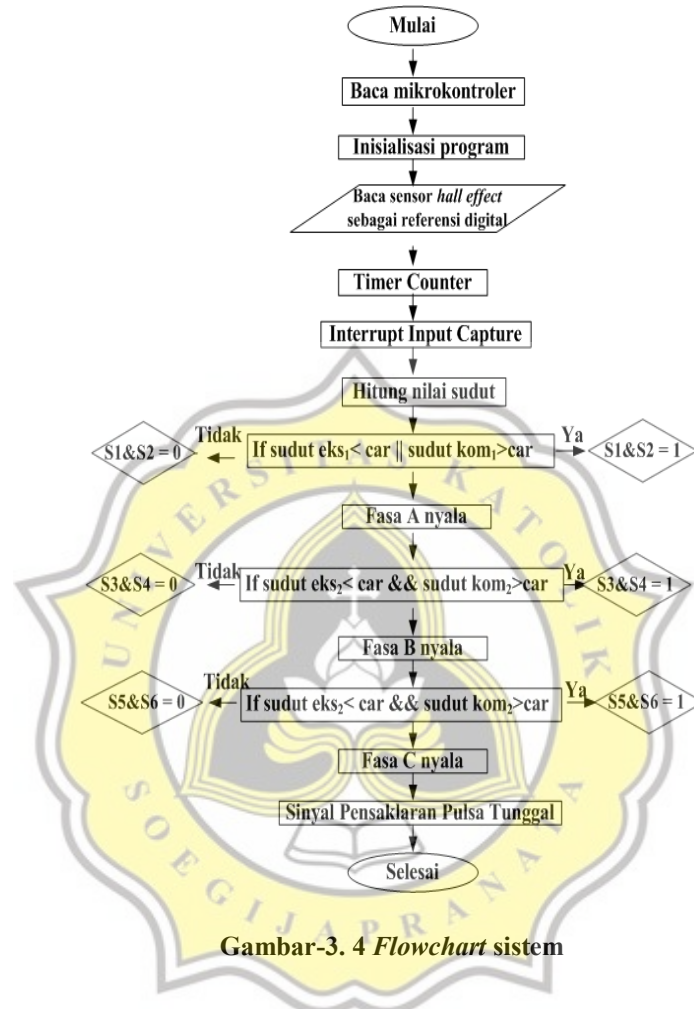
daya digital yang efisien, kontrol mesin listrik yang canggih. Pembangkitan sinyal PWM dari mikrokontroler digunakan untuk proses pensaklaran pada konverter *Asymmetric* yang akan diteruskan menuju IC *buffer* tipe 74HC541N. IC *buffer* ini digunakan untuk menjaga agar tegangan tetap stabil sampai pada rangkaian *Driver* dan rangkain daya. Rangkaian kendali ditunjukkan pada Gambar-3.3



Gambar-3. 3 Rangkaian Kendali

Pada Gambar-3.3 pin pada mikrokontroler yang digunakan untuk sinyal saklar adalah pin E0-E5 yang nantinya akan diteruskan ke ic *buffer*. Sinyal pensaklaran pulsa tunggal diolah menggunakan mikrokontroler jenis dsPIC30F4012 dengan referensi digital berupa sensor *hall effect*. Sinyal masukan digital berupa *hall effect* akan membangkitkan *timer register* yang akan mengaktifkan fasilitas *Input Capture* yang digunakan untuk menentukan θ_{eks} dan

θ_{kom} yang membentuk pola pensaklaran pulsa tunggal. Flowchart sistem pada blok rangkaian kendali disajikan pada Gambar-3.4.

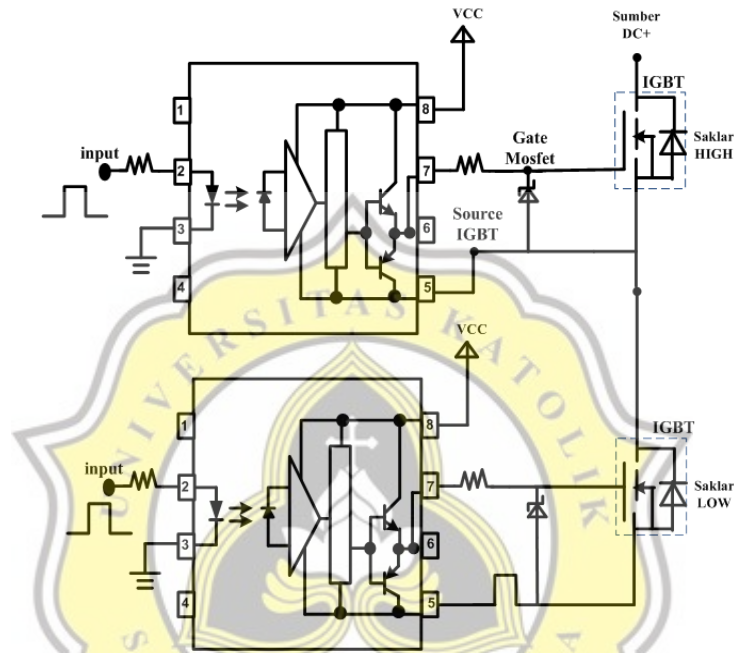


Gambar-3. 4 Flowchart sistem

3.5 Rangkaian Driver

Rangkaian *Driver* memiliki komponen yang sangat penting yaitu *Driver* TLP 250. TLP 250 ini mampu menjadi penghubung antara rangkaian kendali dengan rangkaian daya. Selain itu, TLP 250 mampu memberikan pengaman pada rangkaian daya jika terjadi hubung singkat. Pada rangkaian kendali menghasilkan sinyal pensaklaran sebesar 5 volt kemudian dikuatkan menjadi 12 volt pada rangkaian *Driver* sebelum diteruskan pada rangkaian daya. TLP 250 beroperasi

menggunakan tegangan DC sebesar 12 volt sehingga dapat digunakan untuk sinyal pensaklaran sistem pengereman regeneratif pada SRM. Berikut ini skema rangkaian *Driver* TLP 250 yang dihubungkan dengan saklar IGBT ditunjukkan pada Gambar-3.5.

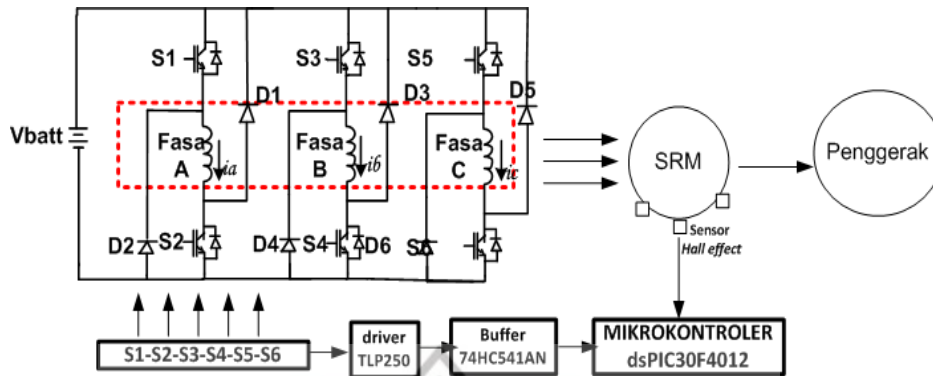


Gambar-3.5 Rangkaian *Driver* TLP 250

3.6 Rangkaian Konverter *Asymmetric*

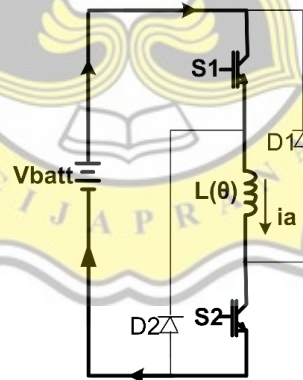
Sistem pengereman regeneratif menggunakan konverter jenis *Asymmetric*. Konverter ini mengimplementasikan dalam satu lengan yang berfungsi untuk menghasilkan tegangan negatif saat arus fasa dimatikan[14]. Konverter *Asymmetric* meliputi enam buah saklar statis tipe IGBT Semikron yang terhubung masing-masing lengan dari IGBT dengan stator tiap fasa pada SRM. Saklar IGBT mendapat sinyal pensaklaran yang diprogram pada rangkaian kendali kemudian diteruskan ke rangkaian *Driver* TLP 250 sebelum menuju ke saklar IGBT. Sinyal pensaklaran

pada IGBT akan diteruskan menuju stator tiap fasa pada SRM. Konverter jenis *Asymmetric* disajikan pada Gambar-3.6.



Gambar-3. 6 Blok konverter jenis *Asymmetric*

Berikut ini adalah mode operasi yang digunakan pada metode pensaklaran pulsa tunggal dengan konverter *Asymmetric*.



Gambar-3. 7 Mode magnetisasi

Gambar-3.7 menunjukkan mode magnetisasi di mana dua sakelar fasa dinyalakan secara bersamaan maka arus mengalir dari sumber batere melalui saklar fasa menuju belitan fasa. Arus induktor akan naik dan menghasilkan GGL balik. Dari mode operasi ini didapatkan persamaan (3-1) dan persamaan (3-2)

$$V_{batt} = iR + \omega L \frac{di}{d\theta} \quad (3-1)$$

$$\frac{(V_{batt} - iR) - e}{\omega L} = \frac{di}{d\theta} \quad (3-2)$$

Keterangan :

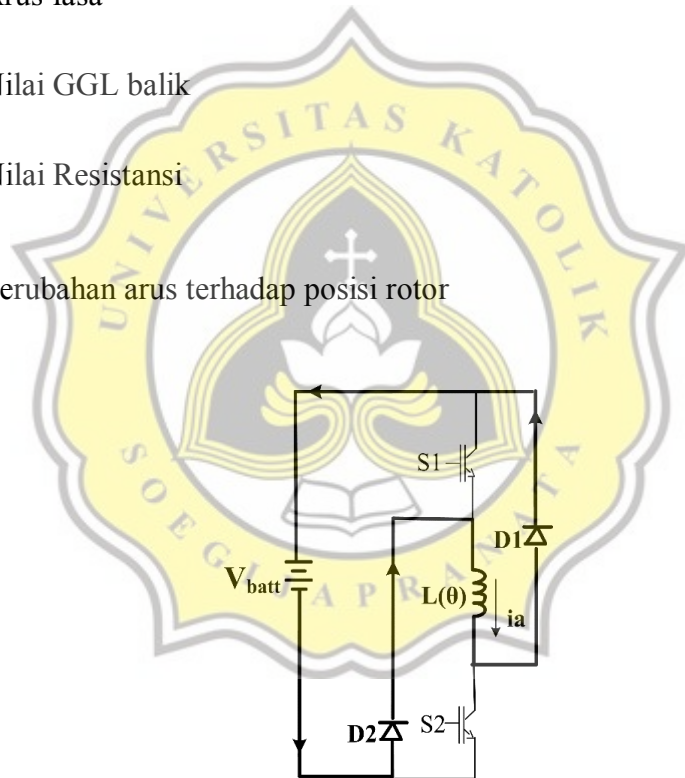
V_{batt} = Tegangan batere

i = Arus fasa

e = Nilai GGL balik

R = Nilai Resistansi

$\frac{di}{d\theta}$ = Perubahan arus terhadap posisi rotor



Gambar-3. 8 Mode demagnetisasi

Gambar-3.8. menunjukkan mode operasi demagnetisasi yaitu kondisi saat dua saklar fasa dimatikan. Arus mengalir dari belitan fasa melalui dioda menuju sumber batere maka arus fasa menurun dan energi yang tersimpan pada belitan fasa menghasilkan nilai GGL balik. Nilai dari GGL balik harus lebih besar dari tegangan

batere agar pengisian daya ke batere dapat maksimal. Pada mode operasi ini tegangan negatif didapatkan karena adanya arus yang kembali ke batere sehingga dihasilkan Persamaan-3.3. dan Persamaan-3.4.

$$-V_{batt} = iR + \omega L \frac{di}{d\theta} \quad (3-3)$$

$$\frac{-(V_{batt} + iR) + e}{\omega L} = \frac{di}{d\theta} \quad (3-4)$$

Keterangan :

V_{batt} = Tegangan batere

i = Arus fasa

e = Nilai GGL balik

R = Nilai Resistansi

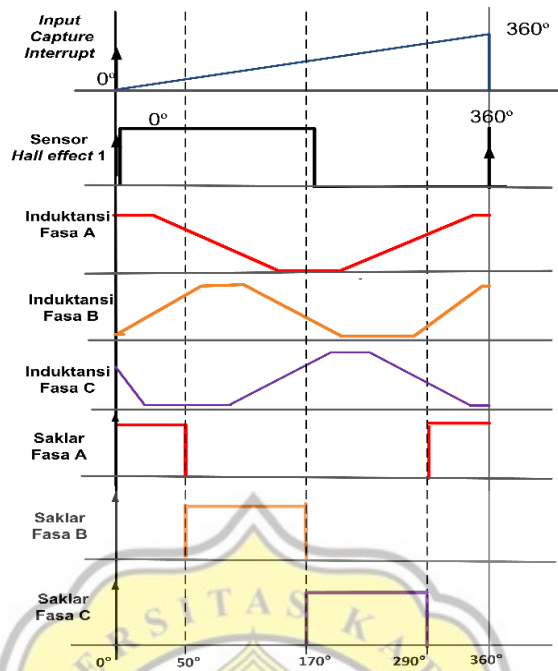
$\frac{di}{d\theta}$ = Perubahan arus terhadap posisi rotor

Berdasarkan mode operasi metode pensaklaran disajikan pula pola pensaklaran yang ditunjukkan pada Tabel-3.2. Pensaklaran dilakukan dengan menggunakan IGBT sebagai saklar statis. Saklar fasa yang dinyalakan akan mengaktifkan belitan fasa pada SRM.

Tabel-3. 2 Pola Pensaklaran pengereman regeneratif pada SRM

Fasa	S1	S2	S3	S4	S5	S6
A	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
B	OFF	OFF-	ON	ON	OFF	OFF
C	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON

Pada Tabel-3.2. menunjukkan pola pensaklaran tiap fasa berdasarkan profil induktansi. Perubahan posisi rotor terhadap stator akan menghasilkan nilai induktansi yang berbeda. Ketika rotor bergerak mendekati stator maka akan menghasilkan nilai induktansi akan naik sedangkan pada saat rotor hendak meninggalkan stator nilai induktansi akan turun. Saklar fasa dinyalakan ketika hendak melakukan injeksi arus pada belitan stator yang dilakukan pada saat nilai induktansi minimum. Injeksi arus pada belitan stator diberikan dengan cara menentukan sudut eksitasi dan sudut komutasi pada sistem kontrol digital menggunakan fasilitas *Input Capture*. Pada satu putaran diasumsikan menghasilkan 360 derajat mekanik sehingga nilai pembacaan *Input Capture* dapat diubah ke dalam *integer* 360 derajat elektrik dengan menggunakan sinyal masukan digital berupa sensor *hall effect*.



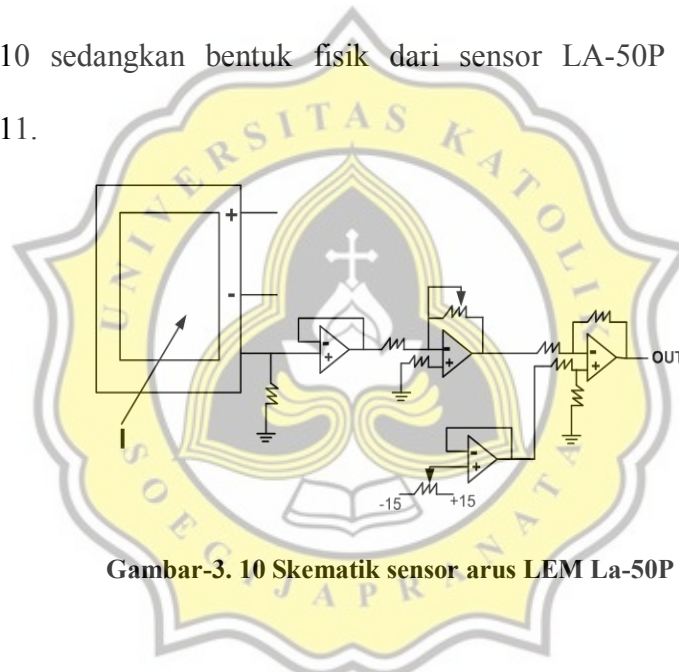
Gambar-3. 9 Pola pensaklaran dengan lebar pulsa kendali 120°

Gambar-3.9. menunjukkan pola pensaklaran tiap fasa berdasarkan profil induktansi dengan nilai lebar pulsa kendali sebesar 120°. Nilai lebar pulsa kendali sebesar 120° didapatkan dari 360° elektrik dibagi dengan tiga fasa. Nilai lebar pulsa kendali berupa jarak antara sudut eksitasi dan sudut komutasi. Perubahan pada nilai sudut eksitasi dapat menghasilkan nilai lebar pulsa kendali yang berbeda. Semakin besar jarak antara sudut eksitasi dan sudut komutasi maka nilai lebar pulsa kendali juga akan semakin besar dan berpengaruh pada bentuk arus fasa yang dihasilkan. Pada Gambar-3.5. disajikan pola pensaklaran dengan lebar pulsa kendali sebesar 140° dimana sudut eksitasi digeser sebesar 20° menjauhi sudut komutasi.

3.7 Sensor Arus

Sensor arus digunakan untuk mengetahui hasil gelombang arus fasa pada pengujian alat. Prinsip kerja dari sensor arus adalah membaca arus melalui kabel tembaga dimana di dalamnya terdapat medan magnet yang ditangkap oleh *intregeted* IC hall dan dikonversi menjadi bentuk tegangan proporsional.

Sensor arus yang digunakan adalah jenis LEM LA-50P yang memiliki batas arus maksimal 50A. Skematik sensor LEM LA-50 P dapat ditunjukkan pada Gambar-3.10 sedangkan bentuk fisik dari sensor LA-50P ditunjukkan pada Gambar-3.11.



Gambar-3. 10 Skematik sensor arus LEM La-50P



Gambar-3. 11 Bentuk fisik sensor arus LEM La-50P

(<https://mtc-technik.de/online-shop/lem-stromwandler-la50-p-current-transducer-50a::7594ID.html>)

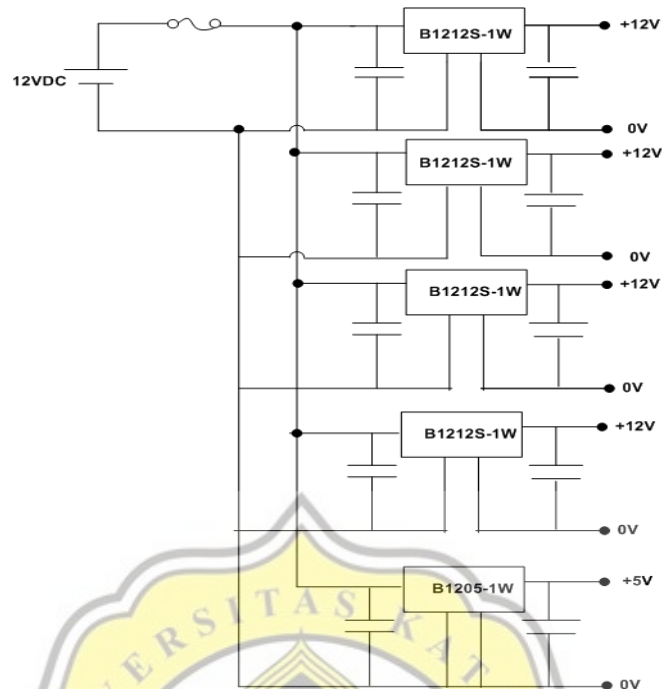
Selain menggunakan sensor arus LEM LA50-P hasil keluaran arus batere dapat dilihat menggunakan sensor *clamp*. Sensor clamp yang digunakan adalah tipe HANTEK yang ditunjukkan pada Gambar-3.12.



Gambar-3.12 Bentuk fisik sensor arus clamp HANTEK.
(<https://indonesian.alibaba.com/g/hantek-2c42.html>)

3.8 Rangkaian *Power Supply DC-DC Isolated*

Rangkaian *Power Supply DC-DC Isolated* memiliki fungsi yaitu memberikan suplai tegangan pada rangkaian kendali dan rangkaian *Driver*. Rangkaian ini memiliki komponen utama yaitu B1212 yang menghasilkan tegangan sebesar 12 Volt untuk menyuplai tegangan rangkaian *Driver* dan B1205 yang menghasilkan tegangan sebesar 5 Volt untuk menyuplai tegangan rangkaian kendali. Skematik rangkaian *power supply isolated* ditunjukkan pada Gambar-3.13.



Gambar-3. 13 Skematik rangkaian *power supply isolated*

Pada Gambar-3.13 menunjukkan skematik pada rangkaian *power supply isolated* yang terdiri dari beberapa komponen pendukung di antaranya *fuse* dan kapasitor. *Fuse* digunakan untuk mengamankan komponen utama jika terjadi *short circuit* sedangkan kapasitor berfungsi untuk menjaga kestabilan tegangan pada *power supply*.