

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pendahuluan

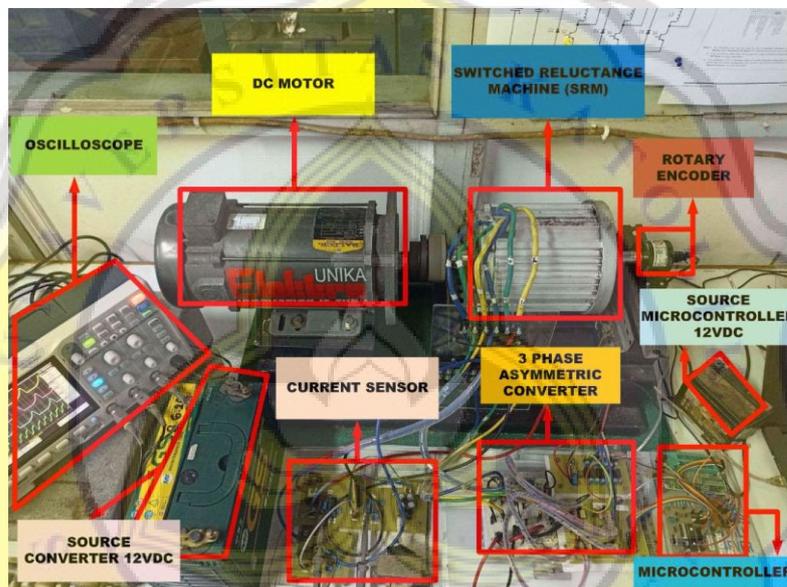
Pada bab ini membahas hasil implementasi dengan pengujian dari perbandingan metode kontrol pengereman regeneratif pada SRM. Modul yang terpasang yaitu rangkaian kendali dari mikrokontroler dsPIC30F4012, rangkaian daya menggunakan IGBT Semikron SKM 40GD123D, dan rangkaian *driver* menggunakan *photoelectric coupler* TLP 250. Untuk mengimplementasikan adanya proses energi kinetik pada kendaraan listrik, maka dilakukan dengan cara SRM diputar dengan bantuan motor DC.

Hasil pengukuran yang akan dibahas pada bab ini adalah pemilihan metode kontrol pengereman regeneratif dengan berbagai variasi kecepatan pada SRM, gelombang keluaran arus fasa, dan arus sumber DC. Pengujian dan pengukuran ini dilakukan untuk membuktikan prototipe yang dibuat penulis sudah sesuai dengan teori dan rancangan alat pada BAB II dan BAB III.

4.2 Hasil Pengujian Alat

Pengujian alat diimplementasikan dengan cara motor DC dioperasikan untuk memutar SRM agar menghasilkan energi kinetik yang akan digunakan untuk sistem proses pengereman regeneratif. Alat yang diuji ini merupakan alat dalam skala prototype yang digunakan sebagai alat pengujian untuk mendapatkan hasil perbandingan antara metode *single-pulse* dan *PWM control. Switched Reluctance*

Machine (SRM) yang digunakan memiliki spesifikasi 12 stator, 8 rotor seperti yang ditunjukkan pada Tabel-4.1. Untuk melakukan operasi pada SRM dibutuhkan konverter *asymmetric* 3 fasa, sensor arus LEM LA 50-P, baterai 12VDC, *rotary encoder* E50S8-2500-3-V-5, osiloskop digital, motor DC, dan mikrokontroler dsPIC30F4012. Implementasi perangkat keras sistem pengereman regeneratif pada SRM disajikan pada Gambar-4.1.



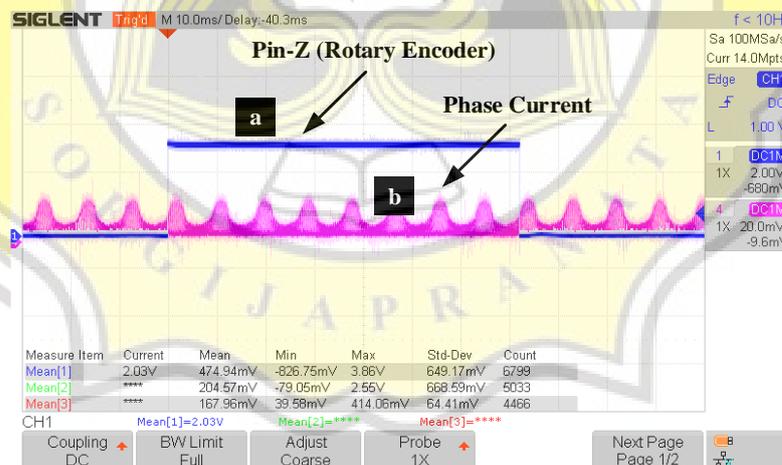
Gambar-4. 1 Implementasi perangkat keras sistem pengereman regeneratif pada SRM

Tabel-4. 1 Spesifikasi SRM

Parameter	Value	Unit
<i>Number of Stator Poles</i>	12	-
<i>Number of Rotor Poles</i>	8	-
<i>Number of Phases</i>	3	-
<i>Rated Current</i>	27	Ampere
<i>Rated Speed</i>	5600	RPM
<i>Rated Voltage</i>	48	Volt
<i>Rated Torque</i>	2.0	N.m
<i>Rated Power</i>	1200	Watt

4.3 Hasil Pengujian dengan Metode *Single-Pulse*

Langkah awal untuk melakukan pengujian dengan cara memberikan injeksi arus eksitasi berupa sudut eksitasi (θ_{eks}). Pada pengujian ini berfokus pada kondisi rotor dan stator dalam posisi tidak sejajar (*unaligned*) serta menghasilkan torka negatif. Untuk menentukan sudut eksitasi (θ_{eks}) maka diperlukan pemetaan dengan bantuan sensor *rotary encoder*. Langkah awal yaitu dengan mengoperasikan SRM dengan *prime mover* motor DC. Maka setelah itu diberikan injeksi pulsa berupa impuls arus pada salah satu belitan fasa stator. Pada Gambar-4.2. merepresentasikan hasil impuls arus pada salah satu belitan fasa stator setiap satu putaran SRM. SRM memiliki delapan rotor sehingga pada Gambar-4.2. ditunjukkan ada delapan puncak impuls arus setiap satu putaran SRM. Pada konsepnya nilai profil induktansi berkebalikan dengan impuls arus.

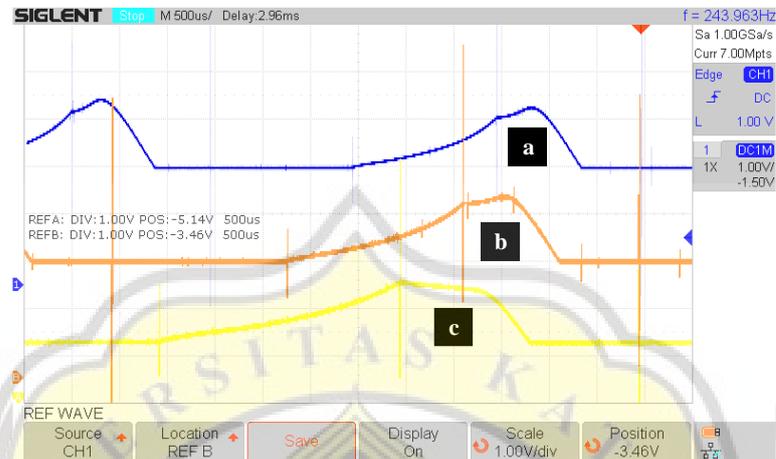


Gambar-4. 2 Hasil impuls arus satu putaran SRM (a) Pin-Z rotary encoder, (b) Arus fasa

Pada pengujian ini menggunakan metode *single-pulse* dengan cara memberikan injeksi pulsa selama interval induktansi meningkat. Salah satu faktor

agar hasil keluaran arus maksimal, maka diperlukan pemberian eksitasi yang tepat.

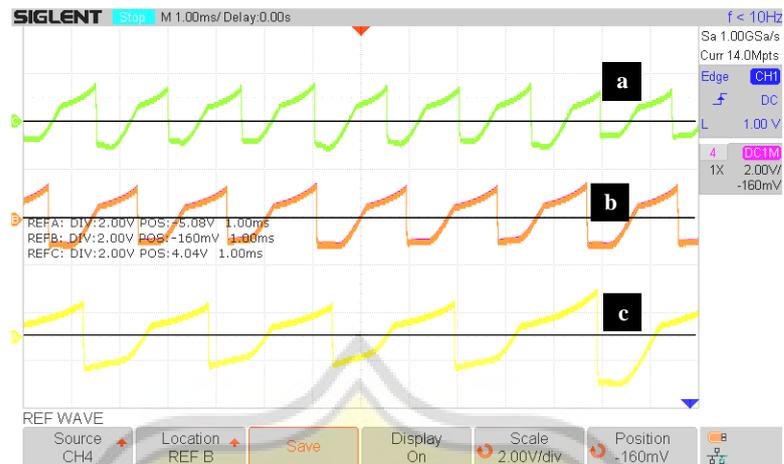
Metode ini lebih optimal diterapkan pada kecepatan 1800 RPM.



Gambar-4. 3 Hasil pengujian arus fasa pada metode *single-pulse* dengan sudut penyalan yang sama (a) 1800 RPM, (b) 1500 RPM, (c) 1200 RPM

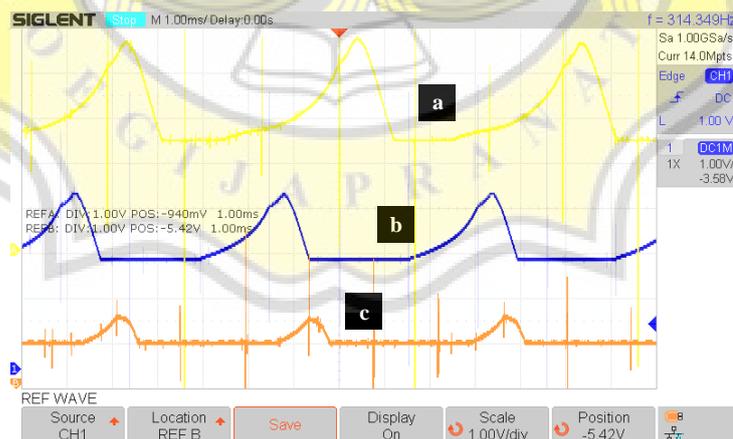
Pada pengujian ini akan membandingkan beberapa variasi kecepatan dengan sudut penyalan yang sama atau tidak diubah. Jika dilihat secara konsepnya apabila SRM dioperasikan menggunakan kecepatan 1200 RPM, maka nilai arus fasa akan semakin besar dikarenakan memerlukan waktu yang lama untuk proses eksitasi. Akan tetapi jika SRM dioperasikan pada kecepatan 1800 RPM, maka waktu yang dibutuhkan untuk proses eksitasi akan lebih cepat tercapai sehingga didapatkan proses generating yang optimal seperti disajikan pada Gambar-4.3.

Pada hasil pengujian arus baterai dapat dilihat bahwa SRM dioperasikan dengan kecepatan 1800 RPM akan menghasilkan luasan area dibawah nol lebih besar daripada area diatas nol. Sehingga pada kondisi ini arus *charging* akan lebih optimal seperti disajikan pada Gambar-4.4.



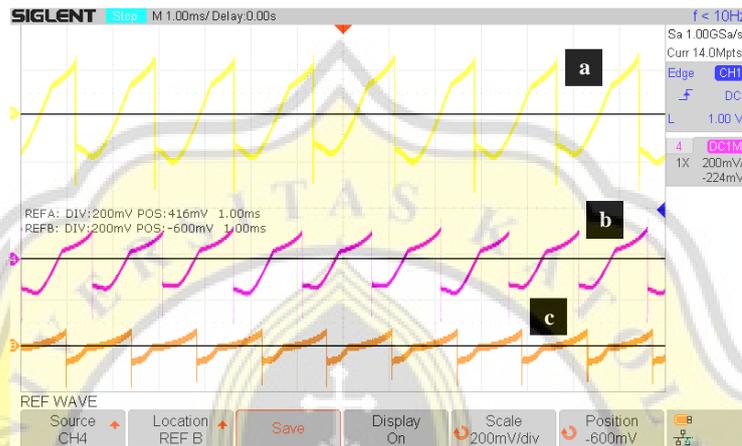
Gambar-4. 4 Hasil pengujian arus baterai pada metode *single-pulse* dengan sudut penyalan yang sama (a) 1800 RPM, (b) 1500 RPM, (c) 1200 RPM

Setelah dilakukan pengujian dengan beberapa variasi kecepatan yang berbeda dengan sudut penyalan yang sama, maka selanjutnya dilakukan pengujian dengan mengambil satu sampel kecepatan (1800 RPM) dengan mengubah beberapa variasi sudut penyalan. Maka akan dihasilkan keluaran arus fasa dan arus baterai yang saling berbeda pada tiap sudut penyalan.



Gambar-4. 5 Hasil pengujian arus fasa menggunakan metode *single-pulse* dengan sudut penyalan yang berbeda pada RPM 1800 (a) Sudut 144, (b) Sudut 202, (c) Sudut 244

Pada pengujian ini pemilihan sudut penyalan yang tepat yaitu sudut 202 karena arus fasa yang dihasilkan tidak terlalu besar, maka waktu yang dibutuhkan untuk proses eksitasi akan lebih cepat tercapai sehingga didapatkan proses *generating* yang optimal seperti disajikan pada Gambar-4.5.



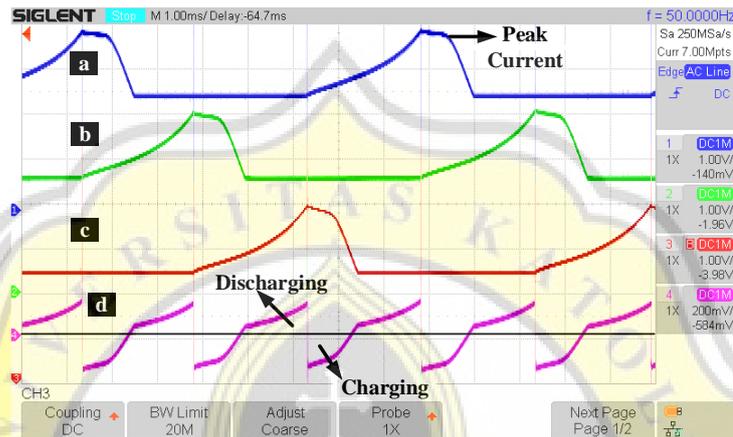
Gambar-4. 6 Hasil pengujian arus baterai menggunakan metode *single-pulse* dengan sudut penyalan yang berbeda pada RPM 1800 (a) Sudut 144, (b) Sudut 202, (c) Sudut 244

Pada hasil pengujian arus baterai dengan pemilihan sudut penyalan yang tepat yaitu sudut 202, maka akan menghasilkan luasan area dibawah nol lebih besar daripada area diatas nol. Sehingga pada kondisi ini arus *charging* akan lebih optimal seperti disajikan pada Gambar-4.6.

4.3.1 Hasil Pengujian Alat pada Kecepatan 1200 RPM

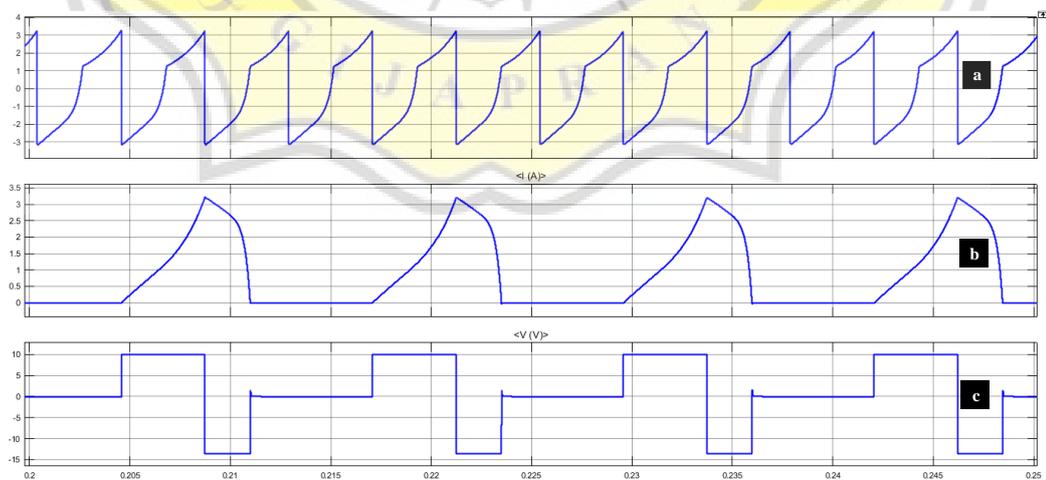
Gambar-4.7. merepresentasikan hasil arus fasa dan arus baterai menggunakan metode *single-pulse* pada RPM 1200. Pada kondisi ini arus baterai yang dihasilkan pada area *charging* lebih kecil daripada di area *discharging*, karena area di bawah nol adalah lebih kecil daripada area di atas nol. Setelah proses eksitasi, arus puncak berkurang karena torka menjadi sangat kecil seperti yang

ditunjukkan pada Gambar-4.7. Nilai efisiensi pengisian yang dihasilkan untuk metode ini adalah 43%. Pada metode *single-pulse* dengan kecepatan putar awal 1200 RPM mengalami perlambatan hingga kecepatan akhir menjadi 1008 RPM ketika SRM dilakukan pengereman.



Gambar-4. 7 Hasil implementasi prototipe menggunakan metode *single-pulse* pada RPM 1200 (a) Ia fasa, (b) Ib fasa, (c) Ic fasa, (d) Arus baterai

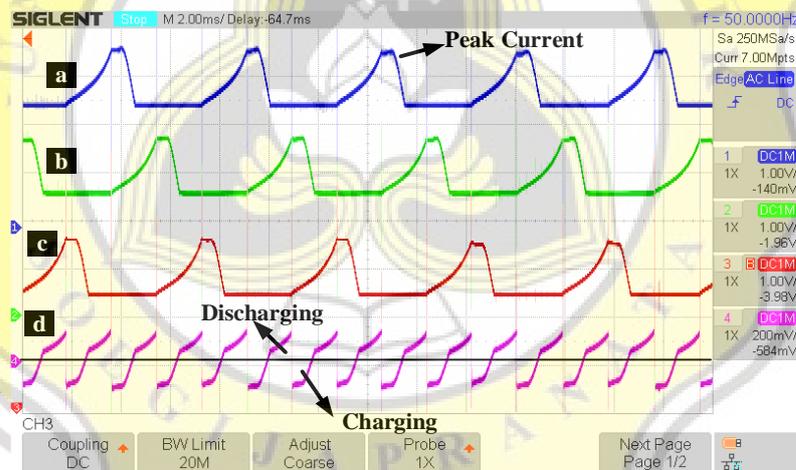
Gambar-4.8. merupakan hasil simulasi pengujian menggunakan perangkat lunak Simulink/MATLAB pada kecepatan putaran rotor 1200 RPM. Simulasi tersebut membantu dalam memverifikasi hasil data pengujian alat.



Gambar-4. 8 Hasil simulasi SRM pada kecepatan 1200 RPM (a) Arus baterai (b) Arus fasa (c)Tegangan fasa

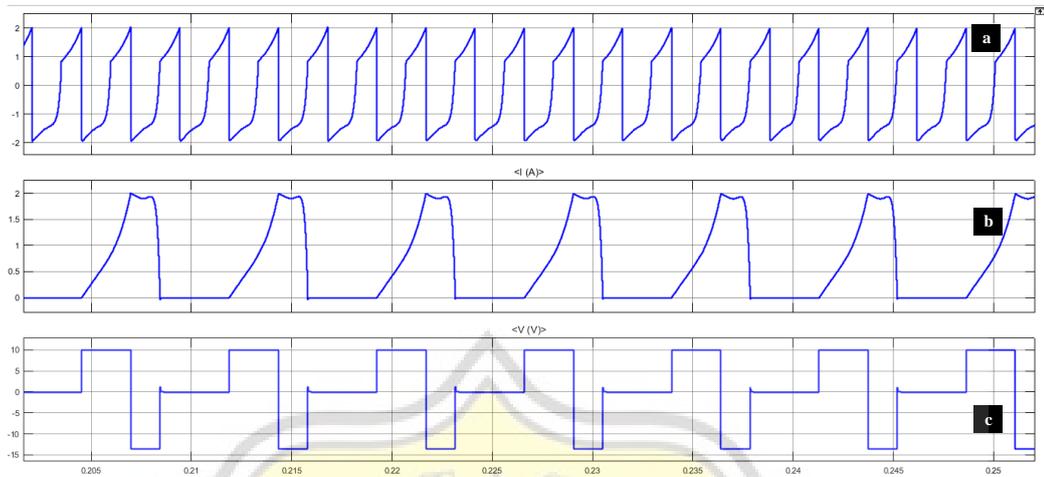
4.3.2 Hasil Pengujian Alat pada Kecepatan 1500 RPM

Gambar-4.9. merepresentasikan hasil arus fasa dan arus baterai menggunakan metode *single-pulse* pada RPM 1500. Pada kondisi arus baterai yang dihasilkan pada area *charging* lebih kecil daripada di area *discharging*, karena area di bawah nol adalah lebih kecil daripada area di atas nol. Setelah proses eksitasi, arus puncak menjadi datar karena eksitasi lebih besar daripada *generating* seperti yang ditunjukkan pada Gambar-4.9. Nilai efisiensi pengisian yang dihasilkan untuk metode ini adalah 47%. Pada metode *single-pulse* dengan kecepatan putar awal 1500 RPM mengalami perlambatan hingga kecepatan akhir menjadi 1351 RPM ketika SRM dilakukan pengereman.



Gambar-4. 9 Hasil implementasi prototipe menggunakan metode *single-pulse* pada RPM 1500 (a) Ia fasa, (b) Ib fasa, (c) Ic fasa, (d) Arus baterai

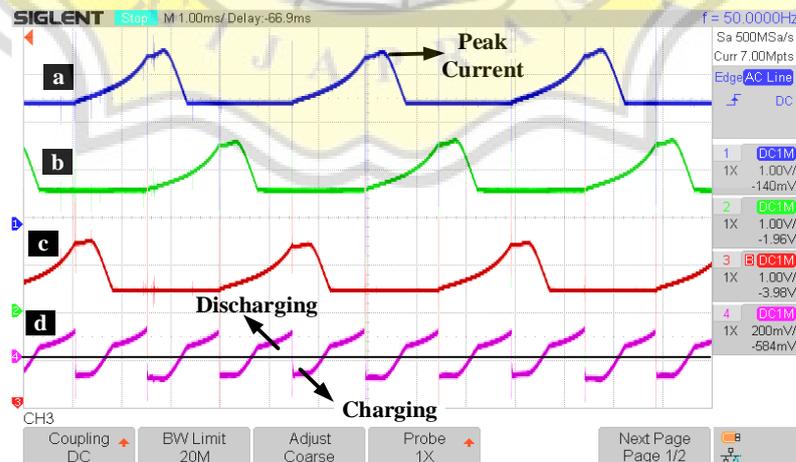
Gambar-4.10. merupakan hasil simulasi pengujian menggunakan perangkat lunak Simulink/MATLAB pada kecepatan putaran rotor 1500 RPM. Simulasi tersebut membantu dalam memverifikasi hasil data pengujian alat.



Gambar-4. 10 Hasil simulasi SRM pada kecepatan 1500 RPM (a) Arus baterai (b) Arus fasa (c)Tegangan fasa

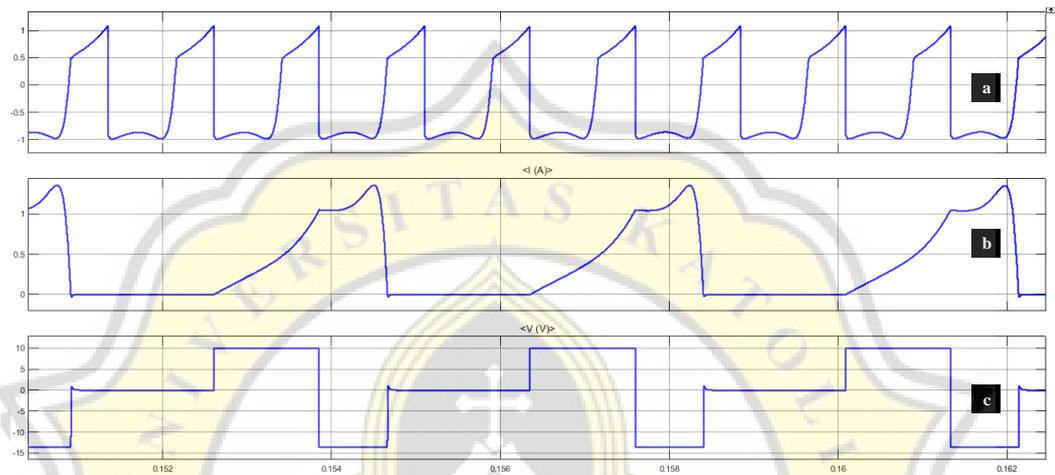
4.3.3 Hasil Pengujian Alat pada Kecepatan 1800 RPM

Gambar-4.11. merupakan hasil arus fasa dan arus baterai menggunakan metode *single-pulse* pada RPM 1800. Pada kondisi ini arus baterai yang dihasilkan pada area *charging* lebih besar daripada di area *discharging*, karena area di bawah nol adalah lebih besar daripada area di atas nol. Setelah proses eksitasi, arus puncak meningkat karena torka konstan seperti yang ditunjukkan pada Gambar-4.11.



Gambar-4. 11 Hasil implementasi prototipe menggunakan metode *single-pulse* pada RPM 1800 (a) Ia fasa, (b) Ib fasa, (c) Ic fasa, (d) Arus baterai

Nilai efisiensi pengisian yang dihasilkan untuk metode ini adalah 51%. Pada metode *single-pulse* dengan kecepatan putar awal 1800 RPM mengalami perlambatan hingga kecepatan akhir menjadi 1691 RPM ketika SRM dilakukan pengereman.



Gambar-4. 12 Hasil simulasi SRM pada kecepatan 1800 RPM (a) Arus baterai (b) Arus fasa (c)Tegangan fasa

Gambar-4.12. merupakan hasil simulasi pengujian menggunakan perangkat lunak Simulink/MATLAB pada kecepatan putaran rotor 1800 RPM. Simulasi tersebut membantu dalam memverifikasi hasil data pengujian alat.

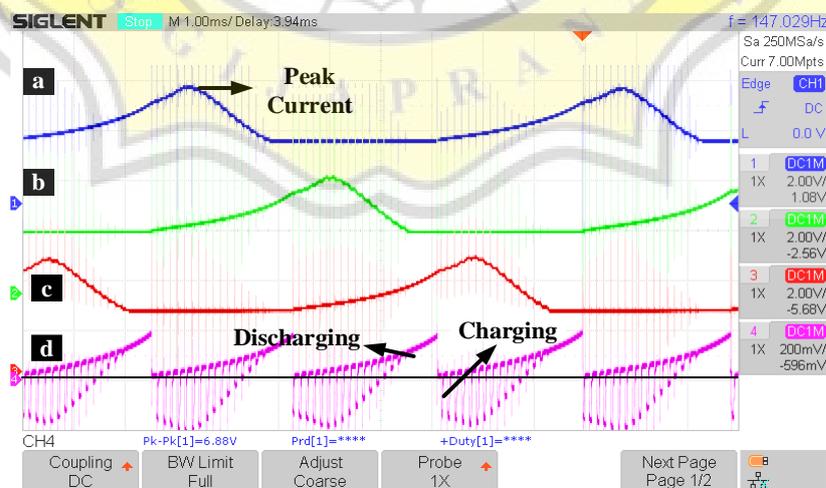
4.4 Hasil Pengujian dengan Metode PWM Control

Pada pengujian ini menggunakan metode PWM *control*, yang mana PWM *control* mencakup mode *magnetizing-freewheeling* dan *magnetizing-demagnetizing*. Untuk mengoperasikan metode ini maka kondisi saklar fasa menyala dan mati pada frekuensi tinggi menggunakan *duty cycle*. Pada kondisi induktansi rendah metode PWM control menggunakan prinsip kerja *boost chopper*,

sehingga tegangan yang dihasilkan *boost chopper* akan menjadi lebih besar dibandingkan tegangan baterai.

4.4.1 Hasil Pengujian Alat pada Kecepatan 1200 RPM dengan Metode *Magnetizing-Freewheeling*

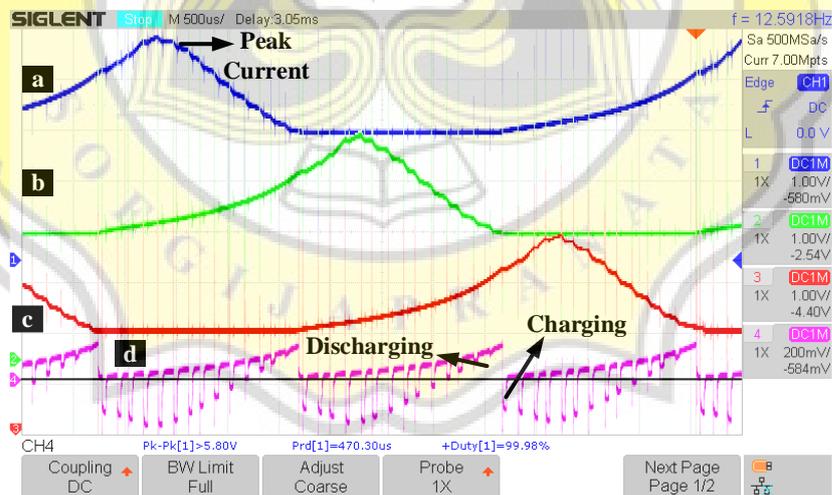
Gambar-4.13. merupakan hasil arus fasa dan arus baterai dengan metode *magnetizing-freewheeling* pada RPM 1200. Pada kondisi ini arus baterai yang dihasilkan pada area *charging* lebih besar daripada di area *discharging*, karena area di bawah nol adalah lebih besar daripada area di atas nol. Setelah proses eksitasi, arus puncak meningkat karena dapat dilihat torca negatif yang dihasilkan cukup optimal untuk pengisian baterai seperti yang ditunjukkan pada Gambar-4.13. Nilai efisiensi pengisian yang dihasilkan untuk metode ini adalah 77%. Pada metode *magnetizing-freewheeling* dengan kecepatan putar awal 1200 RPM mengalami perlambatan hingga kecepatan akhir menjadi 1125 RPM ketika SRM dilakukan pengereman.



Gambar-4. 13 Hasil implementasi prototipe menggunakan metode *magnetizing-freewheeling* pada RPM 1200 (a) Ia fasa, (b) Ib fasa, (c) Ic fasa, (d) Arus baterai

4.4.2 Hasil Pengujian Alat pada Kecepatan 1500 RPM dengan Metode *Magnetizing-Freewheeling*

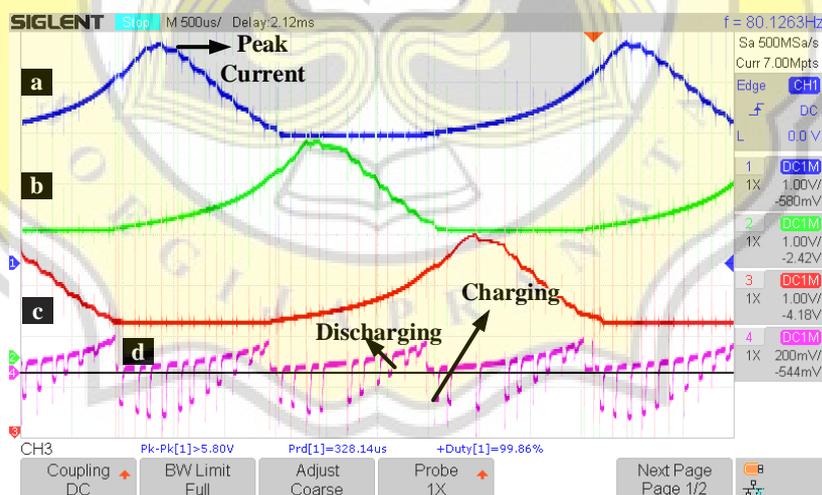
Gambar-4.14. merupakan hasil arus fasa dan arus baterai dengan metode *magnetizing-freewheeling* pada RPM 1500. Pada kondisi ini arus baterai yang dihasilkan pada area *charging* lebih besar daripada di area *discharge*, karena area di bawah nol adalah sedikit lebih besar daripada area di atas nol. Setelah proses eksitasi, arus puncak meningkat karena dapat dilihat bahwa torka negatif yang dihasilkan sedikit optimal untuk pengisian baterai seperti yang ditunjukkan pada Gambar-4.14. Nilai efisiensi pengisian yang dihasilkan untuk metode ini adalah 75%. Pada metode *magnetizing-freewheeling* dengan kecepatan putar awal 1500 RPM mengalami perlambatan hingga kecepatan akhir menjadi 1317 RPM ketika SRM dilakukan pengereman.



Gambar-4. 14 Hasil implementasi prototipe menggunakan metode *magnetizing-freewheeling* pada RPM 1500 (a) Ia fasa, (b) Ib fasa, (c) Ic fasa, (d) Arus baterai

4.4.3 Hasil Pengujian Alat pada Kecepatan 1800 RPM dengan Metode *Magnetizing-Freewheeling*

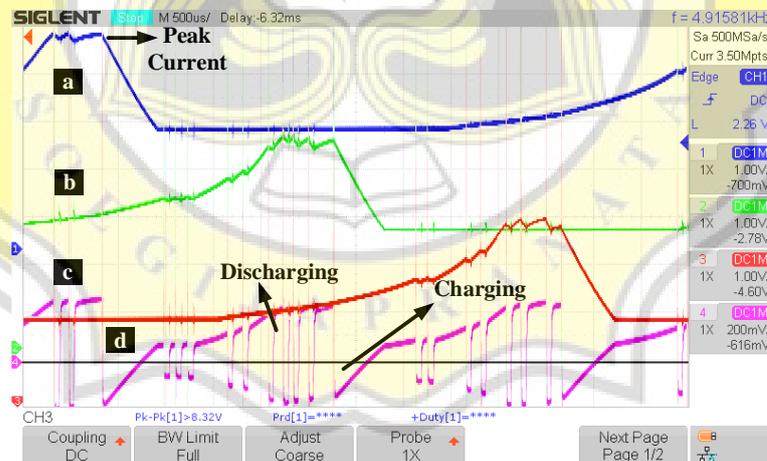
Gambar-4.15. merupakan hasil arus fasa dan arus baterai dengan metode *magnetizing-freewheeling* pada RPM 1800. Pada kondisi ini arus baterai yang dihasilkan pada area *charging* lebih kecil daripada di area *discharging*, karena area di bawah nol adalah lebih kecil daripada area di atas nol. Setelah proses eksitasi, arus puncak menurun karena dapat dilihat bahwa torka negatif yang dihasilkan tidak optimal untuk pengisian baterai seperti yang ditunjukkan pada Gambar-4.15. Nilai efisiensi pengisian yang dihasilkan untuk metode ini adalah 66%. Pada metode *magnetizing-freewheeling* dengan kecepatan putar awal 1800 RPM mengalami perlambatan hingga kecepatan akhir menjadi 1642 RPM ketika SRM dilakukan pengereman.



Gambar-4. 15 Hasil implementasi prototipe menggunakan metode *magnetizing-freewheeling* pada RPM 1800 (a) Ia fasa, (b) Ib fasa, (c) Ic fasa, (d) Arus baterai

4.4.4 Hasil Pengujian Alat pada Kecepatan 1200 RPM dengan Metode *Magnetizing-Demagnetizing*

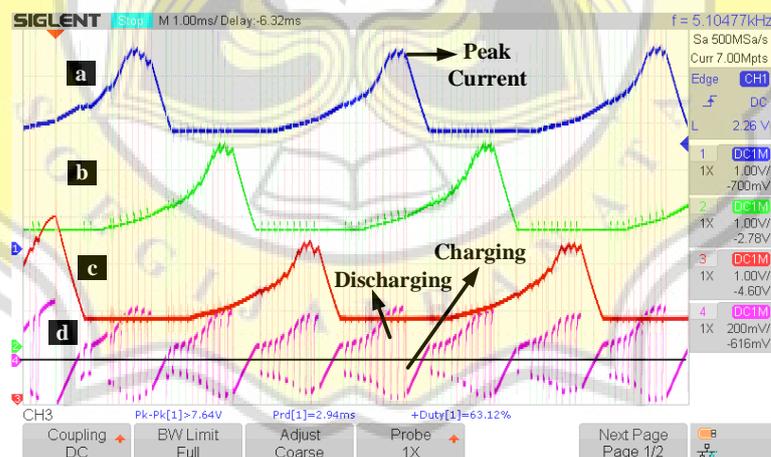
Gambar-4.16. merupakan hasil arus fasa dan arus baterai menggunakan metode *magnetizing-demagnetizing* pada RPM 1200. Pada kondisi ini arus baterai yang dihasilkan pada area *charging* lebih besar daripada di area *discharging*, karena daerah di bawah nol adalah lebih besar dari daerah di atas nol. Setelah proses eksitasi, arus puncak meningkat karena dapat dilihat torka negatif yang dihasilkan cukup optimal untuk pengisian baterai seperti yang ditunjukkan pada Gambar-4.16. Nilai efisiensi pengisian yang dihasilkan untuk metode ini adalah 75%. Pada metode *magnetizing-demagnetizing* dengan kecepatan putar awal 1200 RPM mengalami perlambatan hingga kecepatan akhir menjadi 1097 RPM ketika SRM dilakukan pengereman.



Gambar-4. 16 Hasil implementasi prototipe menggunakan metode *magnetizing-demagnetizing* pada RPM 1200 (a) Ia fasa, (b) Ib fasa, (c) Ic fasa, (d) Arus baterai

4.4.5 Hasil Pengujian Alat pada Kecepatan 1500 RPM dengan Metode *Magnetizing-Demagnetizing*

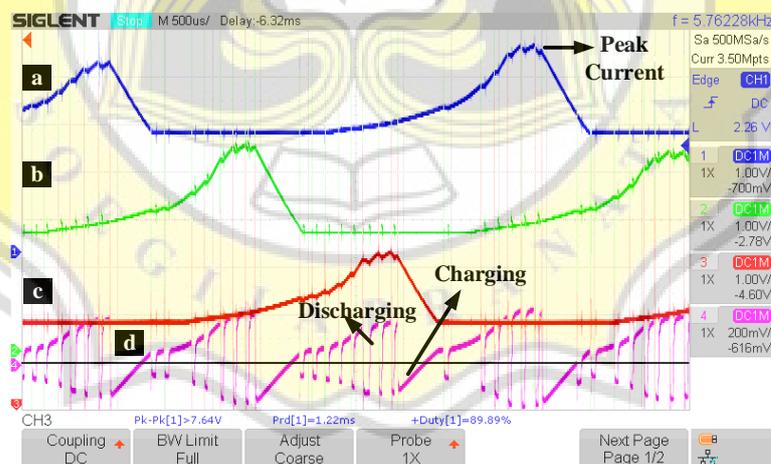
Gambar-4.17. merupakan hasil arus fasa dan arus baterai dengan metode *magnetizing-demagnetizing* pada RPM 1500. Pada kondisi ini arus baterai yang dihasilkan di area *charging* lebih besar daripada di area *discharge*, karena area di bawah nol adalah sedikit lebih besar dari area di atas nol. Setelah proses eksitasi, arus puncak meningkat karena dapat dilihat bahwa torka negatif yang dihasilkan sedikit optimal untuk pengisian baterai seperti yang ditunjukkan pada Gambar-4.17. Nilai efisiensi pengisian yang dihasilkan untuk metode ini adalah 72%. Pada metode *magnetizing-demagnetizing* dengan kecepatan putar awal 1500 RPM mengalami perlambatan hingga kecepatan akhir menjadi 1371 RPM ketika SRM dilakukan pengereman.



Gambar-4. 17 Hasil implementasi prototipe menggunakan metode *magnetizing-demagnetizing* pada RPM 1500 (a) Ia fasa, (b) Ib fasa, (c) Ic fasa, (d) Arus baterai

4.4.6 Hasil Pengujian Alat pada Kecepatan 1800 RPM dengan Metode *Magnetizing-Demagnetizing*

Gambar-4.18. merupakan hasil arus fasa dan arus baterai menggunakan metode *magnetizing-demagnetizing* pada RPM 1800. Pada kondisi ini arus baterai yang dihasilkan pada area *charging* lebih kecil daripada di area *discharging*, karena area di bawah nol adalah lebih kecil daripada area di atas nol. Setelah proses eksitasi, arus puncak menurun karena dapat dilihat bahwa torka negatif yang dihasilkan tidak optimal untuk pengisian baterai seperti yang ditunjukkan pada Gambar-4.18. Nilai efisiensi pengisian yang dihasilkan untuk metode ini adalah 63%. Pada metode *magnetizing-demagnetizing* dengan kecepatan putar awal 1800 RPM mengalami perlambatan hingga kecepatan akhir menjadi 1684 RPM ketika SRM dilakukan pengereman.



Gambar-4. 18 Hasil implementasi prototipe menggunakan metode *magnetizing-demagnetizing* pada RPM 1800 (a) Ia fasa, (b) Ib fasa, (c) Ic fasa, (d) Arus baterai

4.5 Pembahasan

Gagasan ini memanfaatkan energi kinetik pada sebuah motor saat pengereman, yang mana akan diubah menjadi energi listrik dengan mengubah fungsi motor menjadi generator. Pemilihan *Switched Reluctance Machine* (SRM) yang dioperasikan sebagai *Switched Reluctance Generator* (SRG) pada sistem pengereman regeneratif memiliki beberapa keunggulan jika dilihat dari segi konstruksi, yang mana memiliki konstruksi sederhana dan *low cost* dalam perawatan. Untuk mengoperasikan *Switched Reluctance Generator* (SRG) membutuhkan sebuah rangkaian konverter. Konverter yang digunakan yaitu jenis konverter *asymmetric* 3 fasa, yang mana untuk melakukan suatu eksitasinya. Pemilihan konverter *asymmetric* dapat membantu dalam peningkatan efisiensi daya secara efektif, karena ketika saklar statis bekerja konverter *asymmetric* mampu mengurangi terjadinya *ripple* tegangan.

Pada mode operasi *magnetizing* dengan mengatur sudut penyalan dengan cara mengaktifkan θ_{on} yaitu proses rotor diberi arus eksitasi. SRM memiliki karakteristik yaitu membutuhkan pembuatan magnet sementara (*magnetizing*), karena pada bagian stator dan rotor tidak tersedia medan magnet. Maka diperlukan penginjeksian arus pada bagian stator sehingga menginduksi rotor. Penginjeksian arus yang diberikan pada bagian stator akan menghasilkan *back-EMF* (*Electromotive Force*) berupa penyalan sudut eksitasi (θ_{eks}).

Pengujian tahap pertama dilakukan dengan metode *single-pulse* pada variasi kecepatan yang berbeda (1200, 1500, dan 1800 RPM). Pada pengujian dengan metode *single-pulse* menghasilkan nilai efisiensi *charging* pada kecepatan

putar awal 1200 RPM adalah 43%, 1500 RPM adalah 47%, dan 1800 RPM adalah 51%. Maka nilai efisiensi *charging* terbesar untuk metode *single-pulse* adalah sebesar 51% pada kecepatan 1800 RPM. Artinya arus yang dikirimkan ke sisi baterai optimal dan efisien pada kecepatan 1800 RPM.

Pengujian tahap kedua dilakukan dengan metode PWM *control* pada variasi kecepatan yang berbeda (1200, 1500, dan 1800 RPM). Pada pengujian dengan metode PWM *control* menghasilkan nilai efisiensi *charging* pada kecepatan putar awal 1200 RPM adalah 77% (*magnetizing-freewheeling*) 75% (*magnetizing-demagnetizing*), 1500 RPM adalah 75% (*magnetizing-freewheeling*) 72% (*magnetizing-demagnetizing*), dan 1800 RPM adalah 66% (*magnetizing-freewheeling*) 63% (*magnetizing-demagnetizing*). Maka nilai efisiensi *charging* terbesar untuk metode *single-pulse* adalah sebesar 77% (*magnetizing-freewheeling*) dan 75% (*magnetizing-demagnetizing*) pada kecepatan 1200 RPM. Artinya arus yang dikirimkan ke sisi baterai optimal dan efisien pada kecepatan 1200 RPM.

Penelitian ini menyimpulkan efisiensi penerapan metode operasi pengereman regeneratif SRM dengan menggunakan beberapa variasi kecepatan. Pada kecepatan 1800 RPM, metode yang efisien menggunakan metode *single-pulse*. Sedangkan metode PWM *control* saat pengereman regeneratif efisien pada 1200 RPM. Pengaturan PWM pada RPM rendah dapat melakukan operasi pengereman regeneratif secara efisien karena pada kondisi ini diperlukan peningkatan torka negatif. Mode operasi ini menggunakan prinsip kerja *chopper boost*.