

RANCANG BANGUN *EQUALIZER* TEGANGAN SEL MENGGUNAKAN *FLYBACK* KONVERTER UNTUK BATERAI LI-ION TERHUBUNG SERI

Tegar Subekti, Heri Suryoatmojo, dan Sjamsjul Anam

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

E-mail: tegar.subekti14@mhs.ee.its.ac.id ; suryomgt@ee.its.ac.id ; anam@ee.its.ac.id

Abstrak-Saat ini, penyimpanan energi berbasis baterai memiliki peranan penting di berbagai sistem kelistrikan, mulai dari perangkat elektronik sampai dengan sistem berskala besar, termasuk mobil listrik. Baterai Lithium Ion saat ini menjadi paling unggul diantara teknologi baterai yang lain karena kepadatan energinya yang besar. Pada umumnya, sel tegangan dihubungkan seri dalam bentuk *string* untuk mencapai tegangan sistem yang dibutuhkan.

Sel Lithium Ion yang terhubung seri memberikan masalah teknis berupa ketidakseimbangan tegangan yang ada diantara sel yang terjadi karena performa setiap sel yang unik. Hal tersebut akan mengurangi kapasitas yang tersedia pada baterai sehingga lama waktu operasi akan berkurang dan mengakibatkan percepatan degradasi sel karena *overcharge* atau *overdischarge*.

Equalizer tegangan sel menggunakan *flyback* konverter menggunakan arsitektur *cell-to-string*, dimana energi pada sel yang memiliki tegangan lebih tinggi akan ditransfer ke *string* untuk menyeimbangkan tegangan sel.

Kata Kunci – equalizer tegangan sel, flyback converter, baterai Li-Ion

I. PENDAHULUAN

PENYIMPANAN energi berbasis baterai saat ini memiliki peranan penting di berbagai sistem kelistrikan, dari perangkat elektronik sampai dengan sistem berskala besar, termasuk mobil listrik. Baterai Li-Ion saat ini menjadi paling unggul diantara teknologi baterai yang lain karena kepadatan energinya yang besar, tingkat peluahan sendiri yang rendah (self discharge rate), dan tidak ada efek memori. Pada kendaraan hibrid (HEV) atau plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) baterai Li-Ion disusun secara paralel dan seri untuk mencapai energi dan daya yang dibutuhkan HEV atau PHEV tersebut.

Sel Li-Ion yang terkoneksi seri memberikan masalah teknis berupa ketidakseimbangan tegangan yang ada pada antara sel yang terjadi karena inkonsistensi saat proses manufaktur dan performa yang unik pada setiap sel. Setelah baterai mengalami banyak siklus pengisian dan pengosongan, ketidakseimbangan ini akan terus bertambah. Hal tersebut tentu akan mengurangi kapasitas yang tersedia pada baterai sehingga lama waktu operasi berkurang dan dapat mengakibatkan percepatan degradasi sel dan bahaya seperti ledakan atau terbakarnya baterai karena *overcharge* atau *overdischarge* pada sel. Untuk itu, penyeimbangan untuk sel baterai yang terkoneksi seri dibutuhkan untuk mencegah

fenomena tersebut dan untuk memperpanjang kerja baterai. Sebagai salah satu kunci dalam teknologi sistem manajemen baterai, equalizer tegangan sel mempunyai peranan penting di dalamnya.

Teknik penyeimbangan tegangan sel yang telah ada dapat dibagi menjadi 3 kategori, yaitu transfer energi secara resistif, transfer energi secara kapasitif, dan transfer energi dengan konverterelektronik.[1] Solusi dengan menggunakan flyback konverter masuk ke kategori transfer energi dengan konverter elektronik. Topologi ini tidak menggunakan penambahan charger dalam proses menyeimbangkan tegangan sel. Topologi ini dalam rangkaianannya diharapkan memiliki jumlah komponen pasif yang lebih sedikit dibandingkan dengan solusi konvensional.[2]

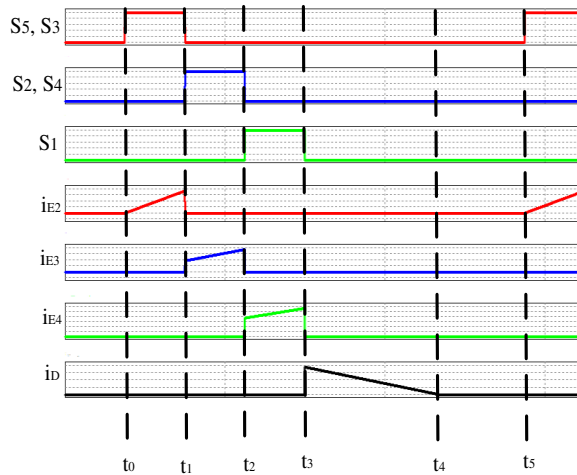
II. URAIAN PENELITIAN

A. Prinsip Kerja Equalizer Menggunakan Flyback Konverter

Proses ekualisasi pada topologi ini, lama waktu ekualisasi yang dibutuhkan akan bertambah secara linier sesuai dengan banyaknya jumlah sel dan besarnya perbedaan tegangan yang tegangan yang terdapat tiap sel[2]. Untuk menjelaskan prinsip kerja *equalizer* maka C_1 diibaratkan memiliki tegangan terkecil, C_2 dengan tegangan terkecil kedua, C_3 dengan tegangan terbesar kedua, dan C_4 dengan tegangan terbesar ($C_1 < C_2 < C_3 < C_4$). Perbedaan tegangan antara C_1 dan C_2 lebih dari 0,02 Volt dan perbedaan tegangan C_2 dan C_3 lebih dari 0,02 Volt. Sehingga dalam keadaan tersebut proses ekualisasi terbagi menjadi 3 mode.

a) Mode Pertama

MOSFET pada sel dengan tegangan terkecil OFF selama mode pertama. MOSFET pada sakelar lain beroperasi berdasarkan urutan tegangan ($C_2 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4$). Gambar 2 menunjukkan bentuk gelombang pensakelaran saat mode 1 ekualisasi.



Gambar 2. Bentuk gelombang pensakelaran mode 1 ekualisasi

Saat interval (t_0-t_1) : S_5 dan S_3 ON berdasarkan urutan tegangan. Arus induktor (i_{Lm}) bertambah yang semula bernilai nol. Arus *discharge* maksimal dari sel C_2 ditunjukkan oleh persamaan (1).

$$\hat{I}_2 = \frac{V_2}{L_m} (t_1 - t_0) \quad (1)$$

Saat interval (t_1-t_2) : S_2 dan S_4 ON berdasarkan urutan tegangan, arus puncak *discharge* dari sel C_3 adalah

$$\hat{I}_3 = \hat{I}_2 + \frac{V_3}{L_m} (t_2 - t_1) \quad (2)$$

Saat interval (t_2-t_3) : S_1 ON dan arus puncak *discharge* dari sel C_4 adalah

$$\hat{I}_4 = \hat{I}_3 + \frac{V_4}{L_m} (t_3 - t_2) \quad (3)$$

Jika

$$(t_0 - t_1) = (t_1 - t_2) = (t_2 - t_3) = \frac{dT_s}{3} \quad (4)$$

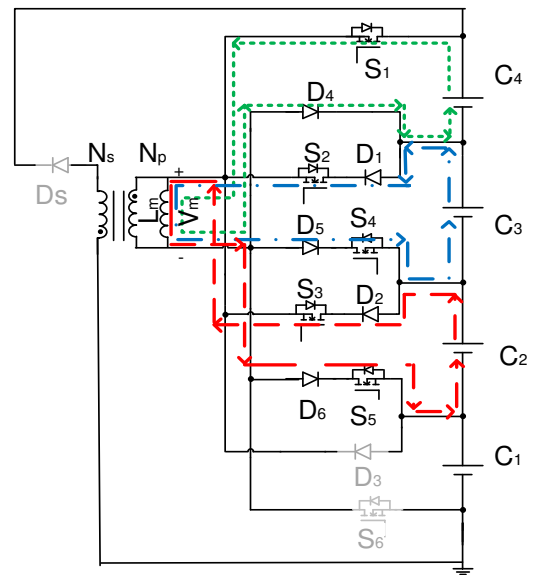
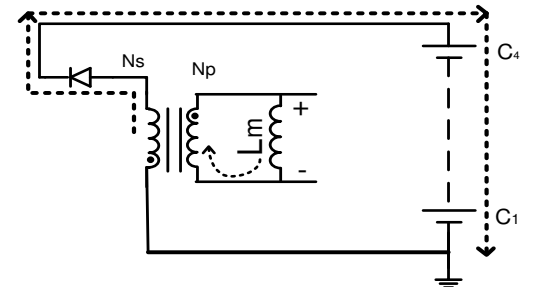
Maka *flyback* konverter berbagi waktu konduksi yang sama diantara 3 sel pada mode pertama, dan arus puncak induktor ditunjukkan oleh persamaan (5) dan arus rata-rata induktor ditunjukkan oleh persamaan (6)

$$\hat{I}_{Lm} = \frac{(V_2 + V_3 + V_4) dT_s}{3 L_m} \quad (5)$$

$$I_{average} = \frac{1}{2} \frac{(V_2 + V_3 + V_4) d^2 T_s}{3 L_m} \quad (6)$$

Saat interval (t_3-t_4) tidak ada sakelar ON, arus L_m tidak dapat berubah seketika. Arus i_{Lm} masuk melalui bagian yang tidak bertanda *dot* (titik) dan keluar pada bagian yang tidak bertanda *dot* (titik) pada sisi sekunder[3], ilustrasi interval ini ditunjukkan oleh Gambar 3(b).

Saat interval (t_4-t_5) tegangan induktor dan arus induktor adalah nol. hal ini menunjukkan bahwa konverter bekerja pada mode DCM. Gambar 3(a) menunjukkan diagram rangkaian saat interval t_0 sampai dengan t_5 .

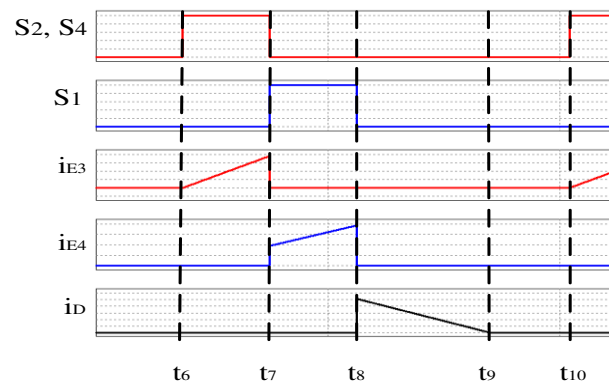
Gambar 3. (a) Diagram rangkaian untuk t_0-t_3 

Gambar 3 (b) diagram rangkaian saat dioda sisi sekunder terbias maju

Proses ini terus berulang hingga tegangan salah satu baterai yang memiliki tegangan yang lebih tinggi (sel C_2 atau C_3 atau C_4) turun dengan nilai $\leq 0,02$ Volt dari tegangan terendah. Dalam penjelasan ini mengasumsikan tegangan C_1 dan C_2 adalah sama.

b) Mode Kedua

Mode kedua mikrokontroler menentukan kembali urutan pensakelaran. S_2 , S_4 , dan S_1 ON berdasarkan urutan tegangan ($V_3 < V_4$). Bentuk gelombang pensakelaran pada mode dua ditunjukkan oleh Gambar 4.



Gambar 4. Bentuk gelombang pensakelaran mode 2 ekualisasi

Saat interval (t_6-t_7) S_2 dan S_4 ON berdasarkan urutan tegangan. Arus puncak *discharge* dari sel C_3 adalah:

$$\hat{I}_3 = \frac{V_3}{L_m} (t_7 - t_6) \quad (7)$$

Saat interval (t_7-t_8) S_1 ON dan arus puncak *discharge* dari sel C_4 adalah

$$\hat{I}_4 = \hat{I}_1 + \frac{V_4}{L_m} (t_8 - t_7) \quad (8)$$

Disini besarnya

$$(t_7 - t_6) = (t_8 - t_7) = \frac{dT_s}{2} \quad (9)$$

Karena *flyback* konverter membagi waktu konduksi yang sama antara C_3 dan C_4 , sehingga besarnya arus puncak induktor adalah:

$$\hat{I}_m = \frac{(V_3 + V_4) dT_s}{2 L_m} \quad (10)$$

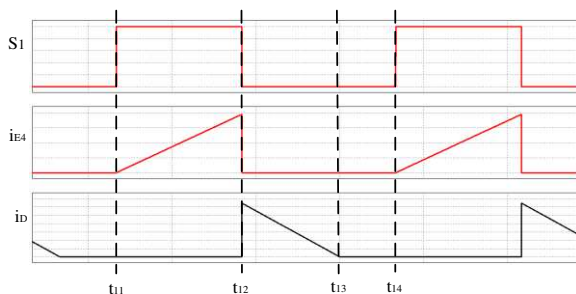
$$I_{average} = \frac{1}{2} \frac{(V_3 + V_4) d^2 T_s}{2 L_m} \quad (11)$$

Saat interval (t_8-t_9) Saat interval ini tidak ada sakelar ON, dioda sisi sekunder terkonduksi, dan arus *charging* mengalir menuju baterai.

Proses ini terus berlangsung hingga salah satu tegangan dari sel C_3 atau C_4 turun ke level yang sama dengan sel yang memiliki tegangan yang lebih kecil (C_2 atau C_1). Dimisalkan tegangan sel C_3 turun ke level yang sama dengan C_2 .

c) Mode Ketiga

Pada Mode ketiga sel C_4 di *discharge*, bentuk gelombang pensakelaran mode ke tiga ditunjukkan oleh Gambar 5



Gambar 5. Gelombang pensakelaran saat tahap 3 ekualisasi

Pada interval ($t_{11}-t_{12}$) S_1 ON, arus *discharge* maksimum dari sel C_4 ditunjukkan dengan persamaan (12), dan arus *discharge* rata-rata ditunjukkan oleh persamaan (13)

$$\hat{I}_4 = \frac{V_4}{L_m} (t_{12} - t_{11}) \quad (12)$$

$$I_{average} = \frac{1}{2} \frac{V_4 d^2 T_s}{2 L_m} \quad (13)$$

Saat interval ($t_{12}-t_{13}$) Saat interval ini sakelar OFF, dioda sisi sekunder terkonduksi, dan arus *charging* mengalir menuju baterai.

Proses terus berlangsung hingga tegangan C_4 turun hingga sama seperti ketiga sel lainnya. Saat keempat tegangan baterai pada level yang sama atau memiliki perbedaan sebesar 0,01 Volt proses ekualisasi berakhir.

Beberapa mode dapat terulang beberapa kali pada tengah atau akhir proses ekualisasi berlangsung. Setelah proses ekualisasi berakhir, mikrokontroler tetap membaca tegangan masing-masing sel, jika ketidakseimbangan terjadi kembali maka proses ekualisasi dapat dimulai kembali.

III. PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI *EQUALIZER* MENGGUNAKAN *FLYBACK* KONVERTER

A. Perancangan *Flyback* Transformer

Adapun parameter-parameter perancangan *flyback* transformer yang telah ditentukan untuk digunakan dalam *equalizer*, antara lain:

1. Tegangan baterai maksimum : 4,2 Volt/sel
2. Arus puncak *discharge* : kurang dari 2,5 A.
3. Frekuensi kerja mode 1 : 20 kHz
4. Frekuensi kerja mode 2 : 30 kHz
5. Frekuensi kerja mode 3 : 60 kHz
6. Duty cycle mode 1, 2, dan 3 : 0,45
7. Rasio primer dan sekunder : 1:3

a. Nilai Induktansi Magnetisasi

Berdasarkan persamaan (5) besarnya induktansi magnetisasi minimum yang dibutuhkan adalah sebesar:

$$L_m = \frac{(3 \cdot V_{baterai}) d T_s}{3 \hat{I}_m} \quad (14)$$

Dimana :

L_m : induktansi magnetisasi (H)

$V_{baterai}$: tegangan baterai (V)

d : duty cycle

T_s : periode (s)

\hat{I}_m : arus puncak maksimum (A)

Perhitungan:

$$L_m = \frac{(3 \cdot 4,2) \cdot 0,45 \cdot 5 \times 10^{-5}}{3 \cdot 2,5} \geq 37,8 \mu H$$

b. Implementasi *Flyback* transformer

Nilai induktansi magnetisasi tidak dapat terukur secara langsung, dan didapat dengan cara mengetahui parameter-parameter seperti induktansi sisi primer, induktansi sisi sekunder dan kebocoran induktansi primer.

Parameter induktansi sisi primer dan sekunder diperoleh dengan melakukan pengujian hubung buka pada sisi primer dan sekunder menggunakan LCR meter. Sedangkan kebocoran induktansi sisi primer dengan melakukan menghubungkan singkat sisi sekunder transformer[4]. Bahan inti yang digunakan dalam implementasi *flyback* konverter adalah *ferrite*. Berikut ini adalah parameter implementasi hasil pembuatan *flyback* transformer.

$$L_{11} = 46,77 \mu H$$

$$L_{22} = 386,7 \mu H$$

$$L_{lk12} = 0,893 \mu H$$

$$L_{lk21} = 5,319 \mu H$$

Dimana:

- L_{11} : induktansi sisi primer (H)
- L_{22} : induktansi sisi sekunder(H)
- L_{lk12} : induktansi bocor sisi primer (H)
- L_{lk21} :induktansi bocor sisi sekunder (H)

Dari parameter-parameter tersebut, nilai induktansi magnetisasi diketahui dengan persamaan (15)

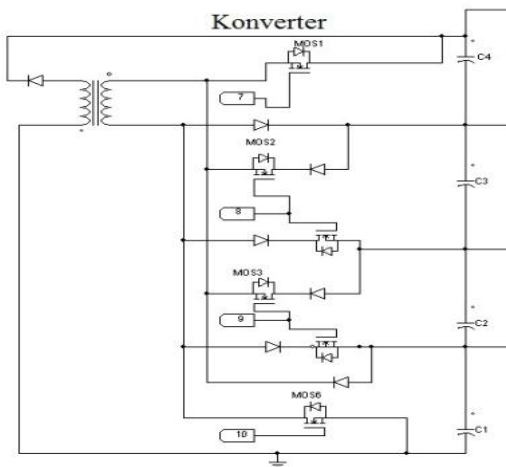
$$L_m = \left(\frac{N_1}{N_2} \right) \sqrt{L_{11}L_{22} - L_{lk12}L_{22}} \quad (15)$$

Sehingga besarnya induktansi magnetisasi sebesar

$$L_m = \left(\frac{1}{3} \right) \sqrt{46,77 \cdot 386,7 - 0,893 \cdot 386,7} = 44,4 \mu H$$

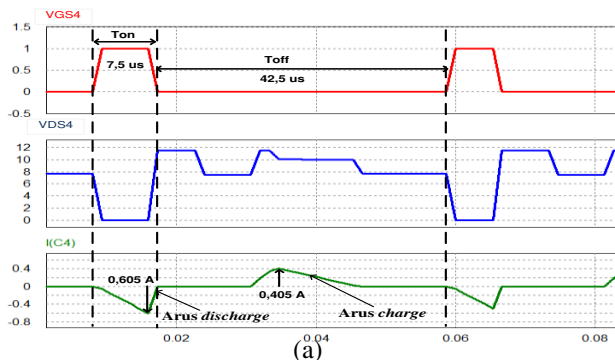
B. Simulasi Equalizer Flyback Konverter

Nilai L_m yang akan digunakan disimulasikan untuk mengetahui proses ekualisasi yang nantinya dilakukan oleh konverter pada tahap implementasi. Parameter yang telah ditentukan dan dihitung dimasukkan ke dalam parameter simulasi. Gambar 7 menunjukkan rangkaian simulasi *equalizer* menggunakan *flyback* konverter.

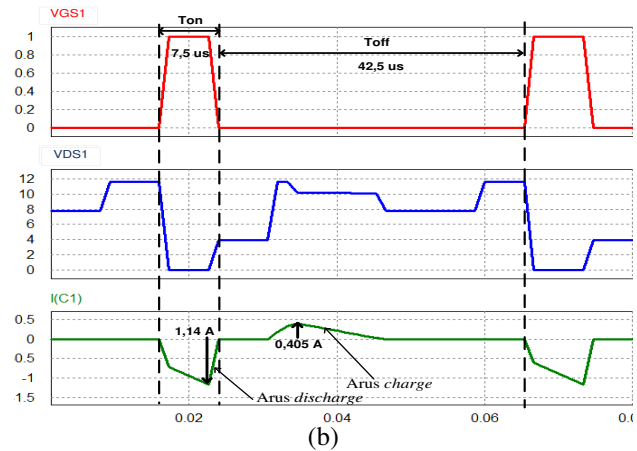


Gambar 7. Rangkaian Simulasi

Dalam simulasi nilai tegangan untuk masing-masing sel adalah: $C_1 = 3,9$, $C_2 = 4$, $C_3 = 3,74$, dan $C_4 = 3,79$. Dalam simulasi ini sakelar ON sesuai urutan tegangan.



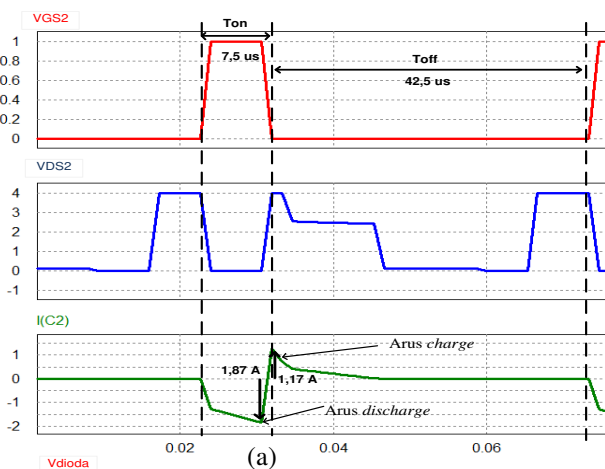
(a)



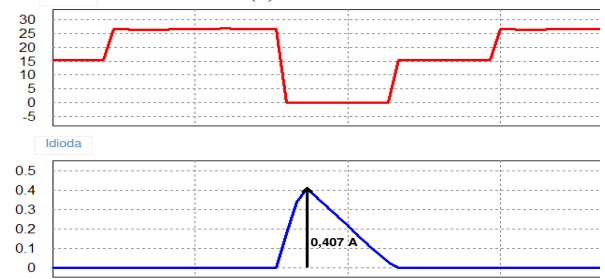
(b)

Gambar 8 Gelombang pensakelaran dan arus (a) C_4 ; (b) C_1

Nilai arus *discharge* pada urutan pensakelaran 2 dan 3 lebih besar karena sebelum L_m *discharge* dan dioda sekunder konduksi, sakelar urutan selanjutnya ON, sehingga arus *discharge* akan semakin tinggi. Gambar 8 (a) dan (b) menunjukkan urutan pensakelaran 1 dan 2 sedangkan Gambar 9 (a) dan (b) merupakan gelombang pensakelaran 3 dan tegangan dan arus dioda sekunder.



(a)



(b)

Gambar 9. Gelombang Pensakelaran dan arus (a) C_2 (b) Dioda sekunder

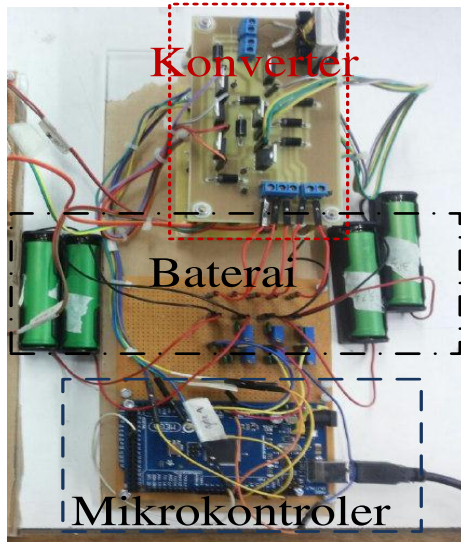
C. Implementasi

Komponen-komponen yang digunakan pada implementasi *equalizer* ini ditunjukkan pada Tabel 1 dan hasil implementasi berupa *equalizer* ditunjukkan oleh Gambar 11.

Tabel 1 Daftar Komponen Implementasi

Komponen	Nilai
----------	-------

<i>Flyback Transformer</i>	44,4 μH
Dioda	1N5822
Sakelar MOSFET	IRF540
<i>Optocoupler</i>	TLP250
Mikrokontroler	ATMega 2560, Arduino Mega

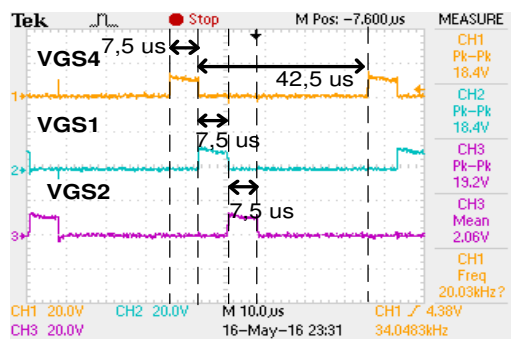


Gambar 10. Hasil Implementasi

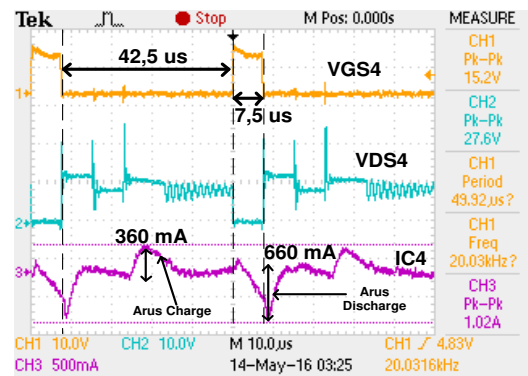
IV. PENGUJIAN *EQUALIZER*

A. Pengujian Bentuk Gelombang

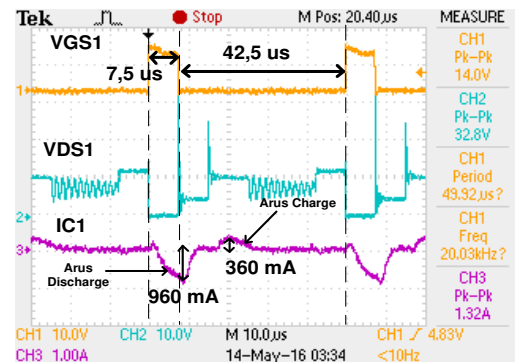
Pengujian terhadap bentuk gelombang bertujuan untuk mengetahui kesesuaian kinerja konverter dengan perancangan dan simulasi. Gambar 11 menunjukkan bentuk gelombang PWM mode 1 dengan urutan pensakelaran C_4 , C_1 dan C_2 .



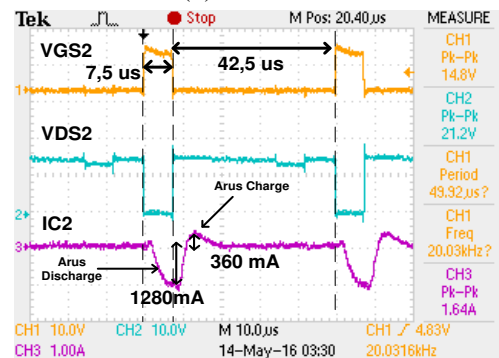
Gambar 11. Gelombang PWM mode1



(a)

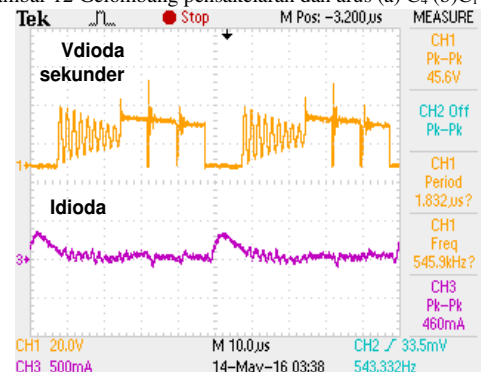


(b)



(c)

Gambar 12 Gelombang pensakelaran dan arus (a) C_4 (b) C_1 (c) C_2



(c)

Gambar 13 Bentuk gelombang tegangan dan arus dioda sekunder

Dari Gambar 11,12, dan 13 menunjukkan bahwa gelombang pensakelaran telah sesuai dengan yang diinginkan. Saat PWM bernilai *low* maka tegangan sakelar akan bernilai *high*, begitu juga sebaliknya, saat pergantian pensakelaran

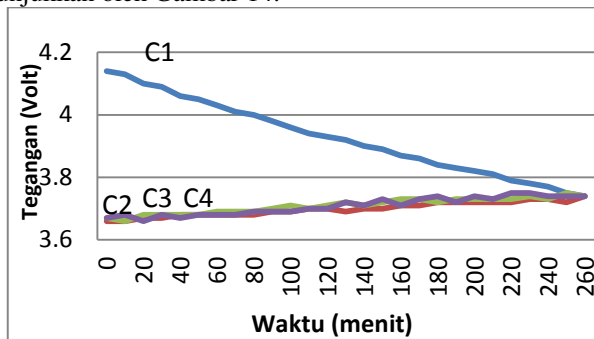
niali arus akan semakin besar karena sebelum L_m discharge sakelar selanjutnya ON. saat tidak ada sakelar ON maka akan ada arus *charging* dari sisi sekunder *flyback* transformer.

B. Pengujian Ekualisasi Baterai Dengan Tegangan Bervariasi

Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui kinerja *equalizer* saat digunakan untuk menyeimbangkan tegangan sel dengan rentang tegangan yang bervariasi.

a. Case 1

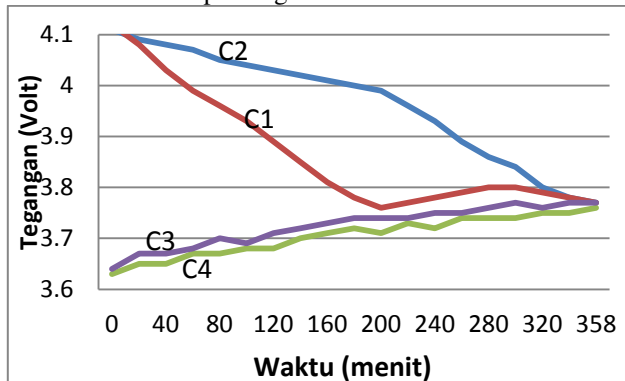
Case 1 dihadapkan pada tegangan salah satu sel mendekati nilai tertinggi dan tiga sel yang lain memiliki nilai tegangan yang lebih rendah. Nilai tegangan sel $C_1 = 4,14V$, $C_2 = 3,66V$, $C_3 = 3,67V$, sel $C_4 = 3,67V$. Setelah proses ekualisasi selama 260 menit keempat tegangan sel menjadi 3,74Volt. Tegangan total awal sebesar 15,14V turun 0,16 Volt menjadi 14,96V. Sebagian besar proses ekualisasi pada case ini *equalizer* berada pada mode operasi 3. Grafik ekualisasi hasil pengujian ditunjukkan oleh Gambar 14.



Gambar 14 Grafik ekualisasi case 1

b. Case 2

Case 2 Tegangan 2 sel berada mendekati nilai maksimal dan 2 sel lainnya dengan tegangan yang lebih rendah. Tegangan masing-masing sel adalah: $C_1 = 4,11V$, $C_2 = 4,12V$, $C_3 = 3,63V$, $C_4 = 3,64V$. Waktu yang dibutuhkan untuk proses ekualisasi adalah sebesar 358 menit dengan nilai tegangan akhir sebesar $C_1 = 3,77V$, $C_2 = 3,77V$, $C_3 = 3,76V$, $C_4 = 3,77V$. Gambar 3.15 merupakan grafik ekualisasi untuk case 2.

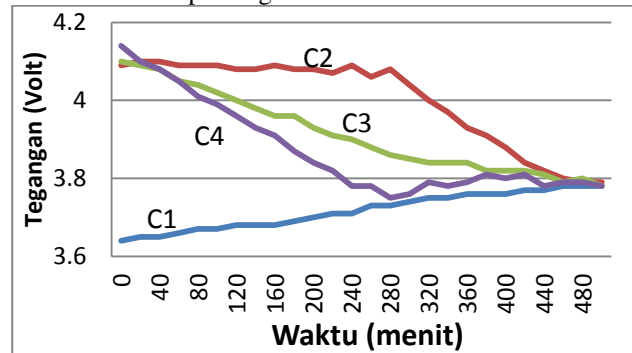


Gambar 15 Grafik ekualisasi case 2

c. Case 3

Pada case 3 tegangan 3 sel baterai dibuat mendekati maksimal dan 1 sel lainnya memiliki tegangan yang lebih

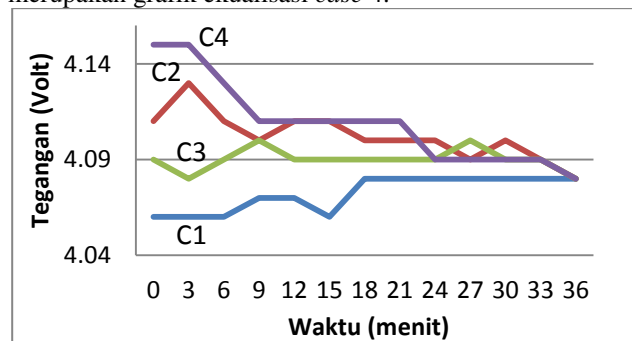
rendah. Berikut adalah tegangan untuk masing-masing sel. $C_1 = 3,64V$, $C_2 = 4,09V$, $C_3 = 4,1V$, $C_4 = 4,14V$. Waktu yang dibutuhkan untuk menyeimbangkan tegangan adalah sebesar 489 menit. Dengan hasil akhir = $3,78V$, $C_2 = 3,79V$, $C_3 = 3,78V$, $C_4 = 3,78V$ atau memiliki perbedaan tegangan 0,01 Volt. Gambar 16 merupakan grafik ekualisasi case 3.



Gambar 16 Grafik ekualisasi Case 3

d. Case 4

Case 4 tegangan baterai hampir seragam, dengan rentang teritnggi dan terendah sebesar 0,09 V. Berikut adalah tegangan masing-masing sel = $4,06V$, $C_2 = 4,11V$, $C_3 = 4,09V$, $C_4 = 4,07V$. waktu yang dibutuhkan untuk menyeimbangkan tegangan sebesar 36 menit dengan hasil akhir tegangan ke empat sel adalah 4,08 Volt. Gambar 17 merupakan grafik ekualisasi case 4.



Gambar 17 Grafik ekualisasi case 4

C. Pengujian Pembebanan Baterai Dengan dan Tanpa Ekualisasi

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui performa baterai yang telah melalui proses ekualisasi. Baterai akan dikosongkan hingga mencapai tegangan 3 Volt. terdapat 2 perlakuan dalam pengujian ini, pertama 4 sel baterai dengan tegangan masing-masing sel adalah $C_1 = 3,66V$, $C_2 = 3,65V$, $C_3 = 3,55V$ dan $C_4 = 3,56V$ dibebani dengan resistor 33 Ohm hingga salah satu sel mencapai tegangan 3Volt. perlakuan ke dua adalah 4 sel baterai diseimbangkan melalui proses ekualisasi dan di bebani hingga mencapai tegangan 3 volt.

Hasil perlakuan pertama adalah baterai dapat beroperasi selama 42 menit, tepat saat kedua baterai dengan tegangan terendah adalah 3Volt.

Perlakuan kedua adalah dengan nilai tegangan yang sama perlakuan pertama, keempat sel diseimbangkan tegangannya menggunakan *equalizer*, lalu dibebani dengan resistor 33 ohm. Hasil ekualisasi tegangan pada perlakuan ke dua adalah

$C_1=3,59V$, $C_2=3,59V$, $C_3=3,58V$, $C_4=3,59V$. Hasil pengujian pembebanan menunjukkan waktu operasi meningkat menjadi 48 menit. Peningkatan waktu operasi sebesar 6 menit dari perlakuan tanpa menggunakan *equalizer*, atau meningkat sebesar 14%.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan data hasil simulasi dan pengujian dapat disimpulkan beberapa hasil sebagai berikut:

1. Pengujian bentuk gelombang pada implementasi sudah menyerupai bentuk gelombang simulasi.
2. Lama waktu ekualisasi dipengaruhi oleh besarnya perbedaan tegangan antar sel. Semakin tinggi perbedaan tegangan dengan nilai tegangan sel terendah, waktu ekualisasi semakin lama.
3. Dari hasil pengujian ekualisasi, perbedaan tegangan tiap sel setelah proses ekualisasi maksimal sebesar 0,01 Volt.
4. Peningkatan waktu operasi kerja baterai setelah baterai di ekualisasi adalah sebesar 6 menit, atau 14% lebih lama dari tanpa perlakuan ekualisasi.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Daowd, N. Omar, P. V. Bossche, and J. V. Mierlo, "Passive and active balancing comparison based on MATLAB simulation," in *Proc. IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, Sep. 2011, pp. 1–7.
- [2] A. M. Imtiaz, F. H. Khan, and H. Kamath, "Time shared flyback converter" based regenerative cell balancing technique for series connected Li-ion battery strings," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 12, pp. 5960–5975, Dec. 2013.
- [3] Hart, Daniel W. 2011. "Power Electronics". New York : The McGraw Hill Companies.
- [4] Hesterman, Bryce. "Analysis and modeling of Magnetic Coupling". Denver Chapter, IEEE Power Electronics Society. Colorado. 2007