

Fast Balancing Energy pada Battery Pack Berbasis Multi Forward Converter Menggunakan Dynamics Consensus Algorithm

Arya Kusumawardana¹

1. Universitas Negeri Malang, Indonesia | arya.kusumawardana.ft@um.ac.id

Abstrak

Ketidak seimbangan energi setiap *cell* pada *battery pack* merupakan hal yang penting untuk diselesaikan. Hal tersebut dapat menimbulkan *over voltage* maupun *under voltage* sehingga dapat menimbulkan kerusakan pada perangkat *battery pack* dan membahayakan pengguna. Untuk menyelesaikan permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan penggunaan topologi P2C (*Pack to Cell*) dengan memanfaatkan *forward converter* pada setiap *cell*. Selain itu, DCA (*Dynamics Consensus Algorithm*) dan PICC (*Proportional Integral Current Controller*) digunakan untuk menjamin energi pada setiap *cell* dapat konvergen. Adapun DCA digunakan sebagai *high level control* yang mengkoneksikan informasi dari masing-masing *cell* yang diolah dan menghasilkan nilai arus referensi untuk *forward converter*. Sedangkan PICC digunakan untuk menjamin arus dari *battery pack* ke setiap *cell* sesuai dengan referensinya. Validasi dari sistem yang didesain dilakukan dengan simulasi menggunakan MATLAB/Simulink. Dari hasil percobaan diketahui bahwa sistem yang diusulkan efektif digunakan untuk menyeimbangkan energi pada setiap *cell*. Hal tersebut ditunjukkan dengan SoC setiap *cell* mampu konvergen pada $t < 14s$ ketika menggunakan topologi *mesh*. Lebih dari itu, percobaan juga dilakukan dengan membandingkan 4 topologi yang diaplikasikan ke DCA. Adapun ke empat topologi tersebut adalah *mesh*, *ring*, *star* dan *line*. Berdasarkan hasil simulasi dapat diketahui bahwa topologi *star* menghasilkan SoC_{conv} paling besar dengan nilai 74.91% dibandingkan topologi lainnya.

Kata Kunci

Battery Pack, Cell, Pack to Cell, Forward Converter, Dynamics Consensus Algorithm

1. Pendahuluan

BMS memiliki peran penting pada *battery pack*. Telah banyak dikembangkan teknologi-teknologi untuk mengatasi ketidak seimbangan energi pada *battery pack*. Secara umum topologi *balancer circuit* pada BMS dibedakan menjadi dua jenis, yaitu pasif dan aktif *balancer* (Ahmad dkk., 2019; Gallardo-Lozano dkk., 2014; Hoque dkk., 2017; Omariba dkk., 2019). Topologi pasif *cell balancing* merupakan topologi yang paling sederhana, topologi ini telah banyak digunakan dan diproduksi untuk keperluan *battery pack* dengan daya rendah. Secara sederhana metode penyeimbangan pada topologi ini memanfaatkan resistor yang dihubungkan dengan masing-masing *cell*. Ketika terdapat energi berlebih pada suatu *cell* maka energi tersebut akan terbuang dalam bentuk panas oleh *shunting resistor* (Michael dkk., 2019; Perisoara dkk., 2018; Wei dkk., 2017). Dengan memanfaatkan disipasi daya tersebut topologi ini kurang efisien untuk *battery balancer*.

Topologi aktif *cell balancing* memanfaatkan circuit external untuk mengirimkan energi antar *cell* (Gallardo-Lozano dkk., 2014). Topologi ini umumnya memanfaatkan komponen kapasitor, transformator, induktor maupun converter (Ahmad dkk., 2019; Omariba dkk., 2019). Mengingat aktif *cell balancing* lebih efisien dibandingkan dengan pasif balancing, banyak teknologi aktif balancing yang telah dikembangkan. Sampai saat ini, aktif balancing dibedakan menjadi beberapa kategori, diantaranya *Cell Bypass* (CB), *Cell-to-Cell* (C2C), *Cell-to-Pack* (C2P), *Pack-to-Cell* (P2C) dan *Cell-to-Pack-to-Cell* (C2P2C).

Pembahasan tentang *cell balancer* tidak hanya fokus pada pengembangan topologi atau BMS *circuit*. Algoritma yang mampu menjamin bahwa masing-masing *cell* dapat konvergen pada waktu yang terbatas juga merupakan hal yang penting. Untuk menjaga agar setiap *cell* terhindar dari kondisi stress karena proses *charging* dan *discharging* ketika penyeimbangan, penelitian (Momayyezani dkk., 2016) mengusulkan topologi *multi switch* untuk memilih *cell* mana saja yang aktif dan non-aktif berdasarkan energi setiap *cell*. Kondisi tersebut menyebabkan keluaran dari *battery pack* menjadi fluktuatif. Oleh karena itu ditambahkan perangkat *boost converter* yang dilengkapi algoritma PID untuk mempertahankan agar keluaran *battery pack* tetap di nilai nominal yang telah ditentukan. Dengan topologi yang sama, FLC (*Fuzzy Logic Controller*) digunakan untuk mengontrol arus ketika proses *charge* dan *discharge* (Goksu dkk., 2020). Proses kontrol arus tersebut dilakukan pada setiap *cell* baik dalam kondisi aktif maupun non-aktif. Untuk menjamin energi setiap *cell* seimbang, CA (*Consensus Algorithm*) diterapkan pada rangkaian BMS (Abhinav dkk., 2014; Li dkk., 2018; Morstyn dkk., 2016). Dengan algoritma tersebut stabilitas sistem dapat diketahui berdasarkan *closed-loop poles*, sedangkan kecepatan konvergensi setiap *cell* dapat diketahui melalui eigenvalue matriks Laplacian.

Pada penelitian ini, untuk menyederhanakan *balancer circuit* sekaligus meningkatkan skalabilitas didesain topologi berbasis P2C dengan forward converter yang dihubungkan pada setiap *cell*. Selain itu, untuk menjamin konvergensi energi antar *cell* maka digunakan DCA (*Dynamics Consensus Algorithm*) sebagai *high level control*. Adapun PICC (*Proportional Integral Current Controller*) dimanfaatkan sebagai *low level control* untuk menjamin arus yang mengalir

dari *pack* menuju ke masing-masing *cell* sesuai dengan referensi. Pada sub-bagian selanjutnya dibahas mengenai permasalahan yang pada BMS yang akan diselesaikan pada penelitian ini.

2. Permasalahan

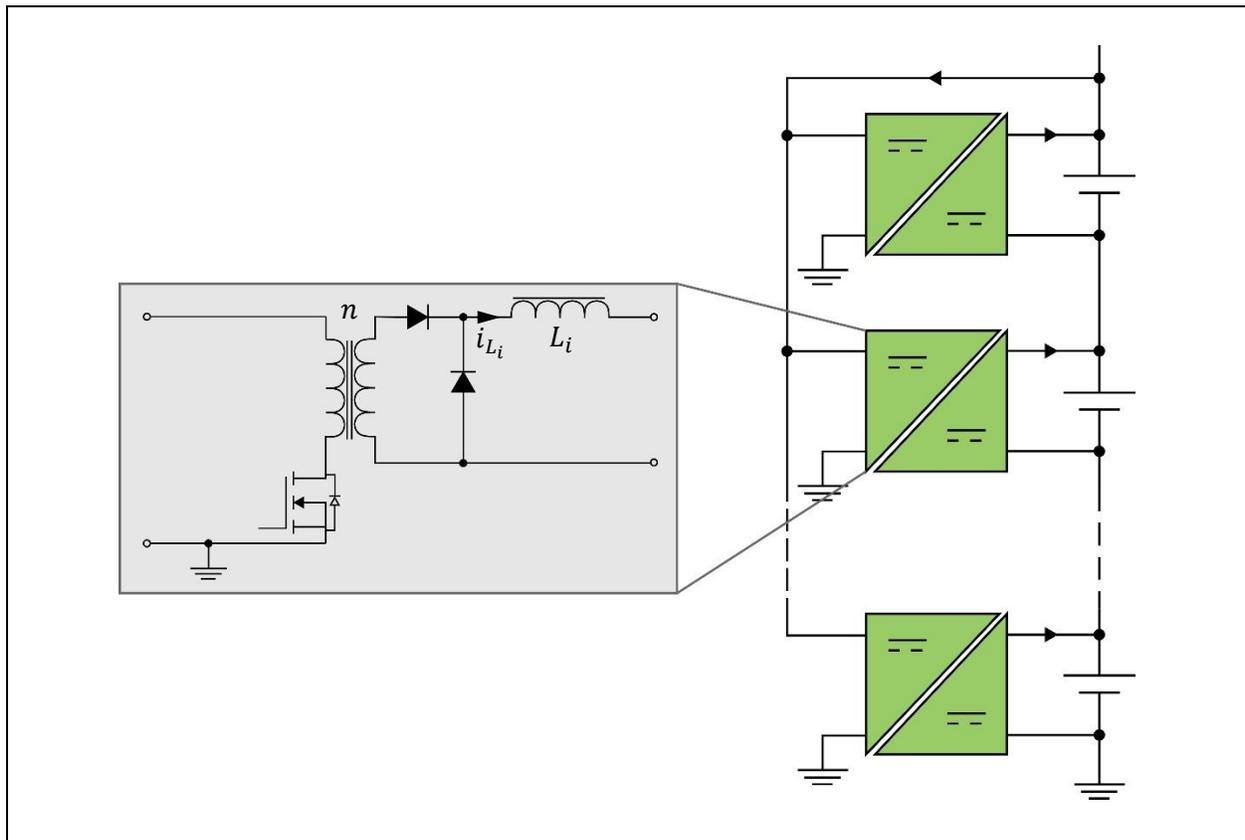
Topologi aktif *cell balancing* mensyaratkan penggunaan komponen aktif untuk mengirimkan energi *cell* berlebih ke energi *cell* yang lebih rendah. Konsep tersebut dapat berupa C2C, C2P, P2C maupun C2P2C. Pada penelitian (Shang dkk., 2019), topologi C2C telah berhasil digunakan untuk menyeimbangkan energi. Namun, konsep multi winding yang diusulkan berdampak negatif pada skalabilitas. Penelitian (Feng Ran dkk., 2015) menawarkan topologi multi transformator dengan satu *switch* untuk pengatur energi yang mengalir ke setiap *cell*. Algoritma yang ditawarkan cukup sederhana dengan memanfaatkan satu *switch* tambahan untuk setiap transformator maka proses penyeimbangan energi antar *cell* dapat dilakukan dengan mengaktifkan dan menon-aktifkan masing-masing *switch* tersebut. Berbeda dengan penelitian sebelumnya, pada penelitian ini diusulkan *multi-forward converter* untuk penyeimbangan energi.

Permasalahan yang muncul jika masing-masing *forward converter* terpisah seperti yang ditunjukkan Gambar 1 (c) adalah perlunya algoritma yang mampu menjamin energi setiap *cell* dalam kondisi seimbangan dalam $t < \infty$. Algoritma tersebut harus dapat memastikan bahwa ketika setiap *cell* dalam kondisi seimbang maka tidak ada energi yang dialirkan. Lebih dari itu, untuk mempermudah pengiriman energi, perlunya kontroler internal yang mampu menjamin bahwa energi yang dikirimkan dari *pack* ke *cell* sesuai dengan porsinya. Dengan kata lain, terdapat dua algoritma yang dibutuhkan untuk menyelesaikan permasalahan dari topologi yang diusulkan. Pada sub-bagian selanjutnya akan dibahas tentang pemodelan dan prinsip kerja dari topologi yang diusulkan.

3. Pemodelan dan Prinsip Kerja BMS

Bentuk sederhana dari P2C yang diusulkan ditunjukkan pada Gambar 1. Untuk mengirimkan energi dari *pack* ke setiap *cell* diberikan rangkaian *isolated dc-dc converter*, atau pada penelitian dikhususkan menggunakan *forward converter*. Diasumsikan *forward converter* yang dirancang mampu mengirimkan arus dari *pack* ke *cell* secara akurat. Maka, untuk mengatur keseimbangan energi di setiap *cell* dapat dilakukan dengan mengatur besar kecilnya arus yang masuk ke masing-masing *cell*. Sederhanya, *cell* dengan sisa kapasitas yang paling rendah akan diberikan aliran daya yang paling besar. Sebaliknya, *cell* dengan sisa kapasitas paling tinggi tidak akan mengaktifkan *forward converter*, dengan kata lain arus yang mengalir ke *cell* tersebut sama dengan 0.

Untuk mempermudah dalam menganalisa topologi yang diusulkan, bentuk sederhana dari topologi tersebut ditunjukkan pada Gambar 1. Secara sederhana, hubungan antara arus yang keluar ataupun masuk ke *battery* dengan SoC (State of Charge) ditunjukkan pada Pers. (1) (Li dkk., 2020; Xia dkk., 2018; Zheng dkk., 2019).



Gambar 1. Penyederhanaan Topologi BMS yang Diusulkan

$$SoC(t) = SoC(t_0) - \frac{\int_{t_0}^t i dt}{Q} \Rightarrow \dot{SoC}(t) = -\frac{i(t)}{Q} \quad \text{Pers. (1)}$$

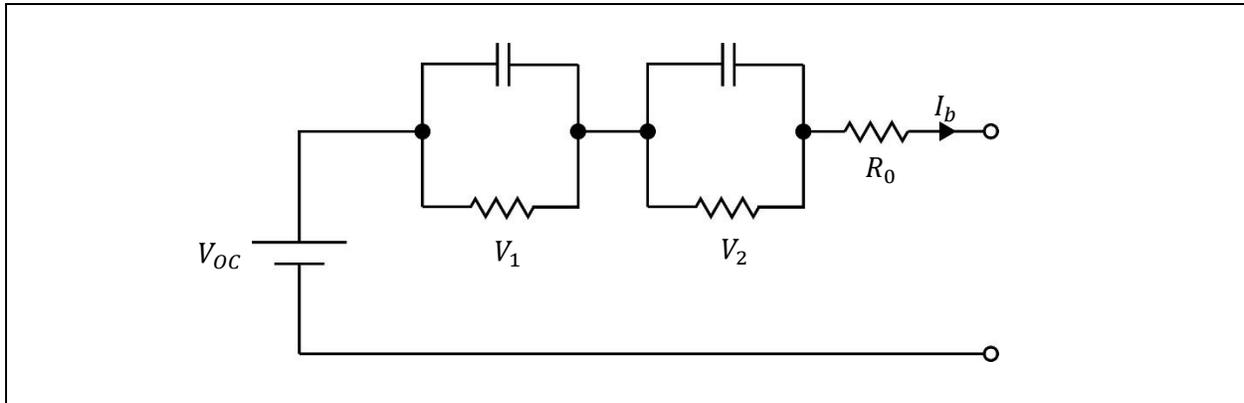
dimana $SoC(t_0)$ merupakan SoC pada kondisi awal dan Q merupakan kapasitas battery. persamaan (1) merupakan representasi energi untuk satu *cell*. Untuk memodelkan *battery pack* keseluruhan, terdapat asumsi sebagai berikut berdasarkan Gambar 2.

Asumsi 1: Komponen internal battery (Rangkaian RC) diabaikan

Pernyataan pada **Asumsi 1** diberikan karena drop tegangan pada internal battery sangat kecil jika dibandingkan OCV (Open Circuit Voltage) dengan $V_1 + V_2 + I_b R_0 \ll V_{OC}$. Selanjutnya, berdasarkan Gambar 1 diketahui bahwa SoC untuk setiap *cell* akan dipengaruhi oleh arus dari pack ke masing-masing *cell*. Untuk lebih mudahnya diberikan asumsi sebagai berikut.

Asumsi 2: arus i_{B_n} selalu bernilai positif dengan masing-masing *cell* dinotasikan sebagai *cell* ke- n dengan $n \in \mathbb{Z}$ dan $n > 0$.

Asumsi 3: meniadakan pengaruh dari losses rangkaian forward converter pada masing-masing *cell*, maka $i_p = i_{B_1} + i_{B_2} + \dots + i_{B_n}$. i_p merupakan arus rangkaian seri pada battery pack.



Gambar 2. Rangkaian RC Representasi Satu *Cell*

Berdasarkan prinsip dari satu arah aliran yang ditunjukkan Gambar 1, **Asumsi 2** dan **Asumsi 3** menegaskan bahwa arus hanya dapat mengalir melalui battery pack ke masing-masing *cell*. Ketika proses balancing, *cell* dengan *SoC* terendah menerima energi dari battery pack. Jika total transfer daya listrik pada battery pack adalah 1 dan masing-masing *cell* kehilangan $1/n$ energi, sehingga *cell* dengan *SoC* terendah tersebut menerima $1 - 1/n$ dan *cell* lainnya kehilangan $-1/n$. Berdasarkan kondisi tersebut dan Pers. (1), maka bentuk state space dari battery pack ditunjukkan pada Pers. (2).

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y &= Cx(t) \end{aligned} \tag{Pers. (2)}$$

dimana $A = 0$, $B = Q_x^{-1}TQ_u$, $C = T$,

$$x(t) = [SoC_1 \quad SoC_2 \quad \dots \quad SoC_n]^T,$$

sedangkan

$$Q_x = \begin{bmatrix} \hat{C}_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \hat{C}_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \hat{C}_n \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times n}, Q_u = \begin{bmatrix} \hat{I}_{L1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \hat{I}_{L2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \hat{I}_{Lm} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times n}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 - \frac{1}{n} & -\frac{1}{n} & \dots & -\frac{1}{n} \\ -\frac{1}{n} & 1 - \frac{1}{n} & \dots & -\frac{1}{n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{1}{n} & -\frac{1}{n} & \dots & 1 - \frac{1}{n} \end{bmatrix}$$

untuk \hat{C}_1 dan \hat{I}_{L1} secara berurutan adalah kapasitas setiap *cell* dan maksimum arus ketika penyeimbangan energi. Dari Pers. (2) diketahui dengan jelas bahwa arus masing-masing *cell* akan sangat mempengaruhi *SoC* disetiap *cell*. Hubungan tersebut ditunjukkan pada matriks T . Pada sub-bagian selanjutnya akan dijelaskan tentang kontroler yang diusulkan.

4. Algoritma Cell Balancing

Terdapat dua kontroler yang digunakan untuk menyeimbangkan energi setiap *cell*. Kontroler pertama merupakan DCA (*Dynamic Consensus Algorithm*) sebagai pengkondisi *SoC* pada battery pack agar selalu sama. Sedangkan kontroler kedua merupakan Kontroler PI untuk menjamin arus yang keluar dari dc-dc converter sesuai dengan kebutuhan penyeimbangan energi.

1) *Dynamic Consensus Algorithm*

Pada dasarnya, DCA merupakan pengembangan dari CA (*Consensus Algorithm*) yang direpresentasikan dalam bentuk waktu diskrit. Konsep dasar dari CA adalah kesepakatan yang diperoleh dari beberapa agent yang terhubung dalam satu jaringan. Jika komunikasi antar *agent* memiliki *bandwidth* yang lebar maka informasi dari masing-masing agent dapat dipresentasikan dalam bentuk persamaan diferensial. Kondisi tersebut dikenal sebagai *Continuous-Consensus Algorithm*. Sedangkan jika komunikasi antar agent dikirimkan dalam bentuk data discrete, maka dapat direpresentasikan dalam bentuk persamaan beda. Kondisi tersebut dinamakan *Discrete-Consensus Algorithm* (Ren dan Beard, 2008). Dari kedua pendekatan tersebut, *Discrete-Consensus Algorithm* merupakan pendekatan yang diterapkan pada penelitian ini.

Sebagai contoh jika terdapat n agent dalam satu jaringan. Topologi komunikasi antar agent direpresentasikan oleh directed graph $\mathcal{G}_n \triangleq (\mathcal{V}_n, \mathcal{E}_n)$, dimana $\mathcal{V}_n = \{1, \dots, n\}$ merupakan node dan $\mathcal{E}_n \subseteq \mathcal{V}_n \times \mathcal{V}_n$ merupakan penghubung. Bentuk persamaan DCA ditunjukkan pada Pers. (3).

$$x_i[k + 1] = \sum_{j=1}^n w_{ij}[k] x_j[k], \quad i = 1, \dots, n \quad \text{Pers. (3)}$$

dimana k dinotasikan sebagai event komunikasi, $w_{ij}[k]$ merupakan bagian dari stokastik matrik $W = [d_{ij}] \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Diasumsikan bahwa $w_{ij}[k] > 0$ untuk semua $i = 1, \dots, n$ dan $w_{ij}[k] > 0$ untuk $i \neq j$ jika terdapat komunikasi dari agent j ke i , sedangkan $w_{ij}[k] = 0$ untuk kondisi lainnya.

Discrete-consensus algorithm pada persamaan (1) dapat direpresentasikan dalam bentuk matriks seperti pada Pers. (4).

$$[k + 1] = W[k]x[k] \quad \text{Pers. (4)}$$

Konsensus tercapai jika untuk semua $x_i[0]$ dan untuk semua $i, j = 1, \dots, n$, $|x_i[k] - x_j[k]| \rightarrow 0$ pada $k \rightarrow \infty$. Berdasarkan Pers. (4) dan literatur (Meng dkk., 2016), matriks W dapat diketahui berdasarkan Pers. (5)

$$W = I - \varepsilon L \quad \text{Pers. (5)}$$

dimana I merupakan matriks identitas dan ε merupakan konstanta konvergensi dari sistem. Nilai ε dapat dicari berdasarkan Pers. (6).

$$\varepsilon = \frac{2}{\lambda_1(L) + \lambda_{n-1}(L)} \quad \text{Pers. (6)}$$

dimana $\lambda_j(\cdot)$ merupakan *eigenvalue* dari matriks L , dimana matriks L merupakan matriks Laplacian $L = A - D$. A merupakan matriks *adjacency* dan D merupakan diagonal matriks. Dari Pers. (4) dan Pers. (6), maka Discrete Consensus Algorithm ditunjukkan pada Pers. (7).

$$x_i(k + 1) = x_i(k) + \varepsilon \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_j(k) - x_i(k)) \quad \text{Pers. (7)}$$

dimana a_{ij} merupakan bagian dari matriks adjacency.

Untuk menjamin akurasi ketika terdapat perubahan dinamika pada sistem pada usulan penelitian ini, algoritma consensus dimodifikasi berdasarkan literatur (Mehyar dkk., 2007), ditunjukkan pada Pers. (8) dan Pers. (9).

$$x_i(k + 1) = x_i(0) + \varepsilon \sum_{j \in N_i} \gamma_{ij}(k) \quad \text{Pers. (8)}$$

$$\gamma_{ij}(k + 1) = \gamma_{ij}(k) + a_{ij} (x_j(k) - x_i(k)) \quad \text{Pers. (9)}$$

Dari Pers. (8) dan Pers. (9) maka DCA yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Pers. (10) dan Pers. (11). Dari kedua persamaan tersebut dapat diketahui bahwa keluaran dari DCA berupa nilai arus untuk masing-masing *cell*. Dengan kata lain, kontroler tersebut tidak dapat digunakan secara langsung untuk converter yang diusulkan.

$$i_i(k + 1) = i_i(0) + \varepsilon \sum_{j \in N_i} \gamma_{ij}(k) \quad \text{Pers. (10)}$$

$$\gamma_{ij}(k + 1) = \gamma_{ij}(k) + a_{ij} (SoC_j(k) - SoC_i(k)) \quad \text{Pers. (11)}$$

2) Kontroler PI

Untuk menjamin setiap converter mampu mengirimkan arus berdasarkan keluaran DCA, kontroler PI digunakan sebagai penjamin hal tersebut. Kontroler PI digunakan sebagai kompensator arus induktor i_L . Karena induktor L_i dihubungkan secara langsung dengan *cell* yang sebagai beban, maka dapat dituliskan $i_L \approx i_{B_n}$. Adapun kontroler PI ditunjukkan pada Pers. (12).

$$d_i(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt \quad \text{Pers. (12)}$$

dimana d_i merupakan duty cycle untuk *cell* ke- i dengan $d \in [0,1]$. Sedangkan e merupakan selisih antara referensi dengan arus i_L , sehingga dapat dituliskan $e = i_i - i_L$.

Tabel 1. Parameter Sistem

No	Parameter	Simbol	Nilai
1	Perbandingan lilitan trafo	n	1
2	Induktor Forward Converter	L_i	1.5mH
3	Tegangan nominal <i>battery</i>	V_{nB_i}	3.7V
4	Kapasitas <i>battery</i>	\hat{C}_i	1Ah
5	Resistansi internal <i>battery</i>	R_{in_i}	0.037Ω
6	Tegangan <i>cut-off battery</i>	V_{CT_i}	2.77V
7	Nominal arus <i>discharge</i>	I_{n_i}	3A
8	Konstanta DCA	ε	0.5
9	Parameter Proporsional	k_p	3
10	Parameter Integral	k_i	20
11	<i>Duty cycle</i> maksimum	D_{max}	0.95
12	<i>Duty cycle</i> minimum	D_{min}	0
13	Arus referensi maksimum	i_i^{max}	2
14	Arus referensi minimum	i_i^{min}	0

5. Hasil dan Pembahasan

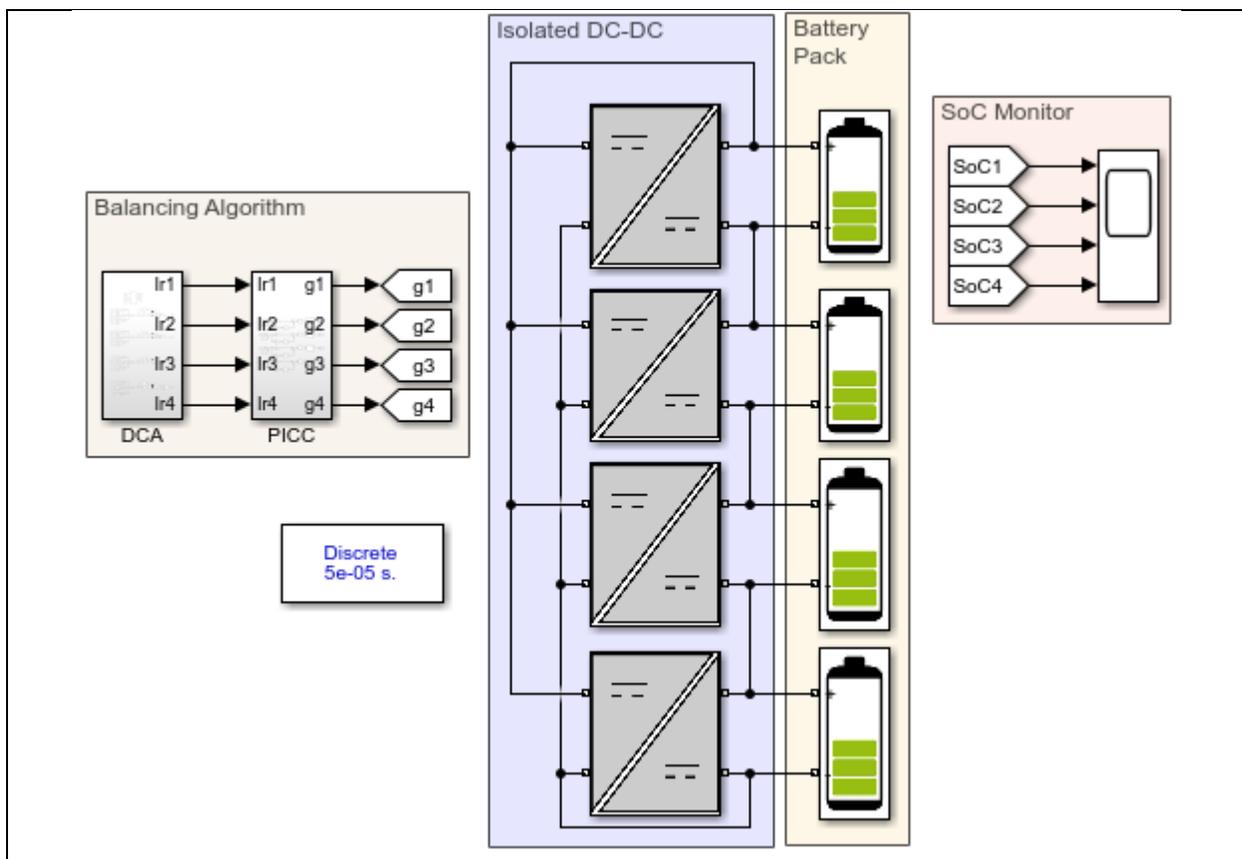
Untuk mengetahui keefektifan topologi dan algoritma yang disusulkan, validasi dilakukan dengan simulasi menggunakan MATLAB/Simulink. Gambar 3 merupakan blok diagram yang digunakan untuk mensimulasikan sistem yang dibangun.

Dari Gambar 3 dapat diketahui bahwa terdapat empat bagian inti dari simulasi. Pertama permukaan bagian *Balancing Algorithm*, dimana bagian ini terdapat dua kontroler yaitu DCA untuk menjamin energi pada masing-masing *cell* akan konvergen pada $t < \infty$ dan PICC

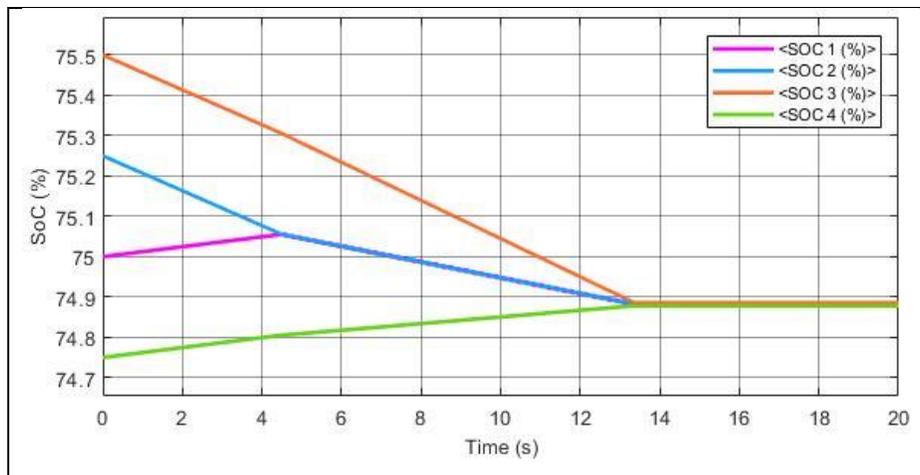
(Proportional Integral Current Controller) digunakan untuk menjamin bahwa arus yang mengalir ke setiap *cell* sesuai dengan keluaran DCA. Kedua merupakan bagian *Isolated* DC-DC yang berisikan empat rangkaian *Forward Converter*. Ketiga merupakan *Battery Pack* yang merupakan rangkaian 4 buah *battery* dengan rangkaian seri. Terakhir merupakan *SoC Monitor* merupakan bagian untuk mengetahui kondisi SoC pada masing-masing *battery*.

Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB/Simulink 2019b dengan *sample time* $50\mu s$. Adapun parameter sistem ditunjukkan pada Tabel 1.

Untuk mengetahui konvergensi setiap *cell*, pengujian awal dilakukan dengan menggunakan topologi *mesh*. Nilai SoC awal untuk masing-masing *cell* secara beurutan dari *cell-1* sampai *cell-4* adalah 75%, 75.25%, 75.5% dan 74.75%. Perbedaan nilai awal SoC dibuat kecil untuk mempercepat waktu simulasi. Adapun hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 4. Hasil simulasi menunjukkan bahwa SoC setiap *cell* konvergen pada $t < 14s$. Hal tersebut menunjukkan bahwa algoritma yang disusulkan efektif digunakan untuk menjamin bahwa energi setiap *cell* akan konvergen pada t terbatas.



Gambar 3 Diagram Simulasi Simulink



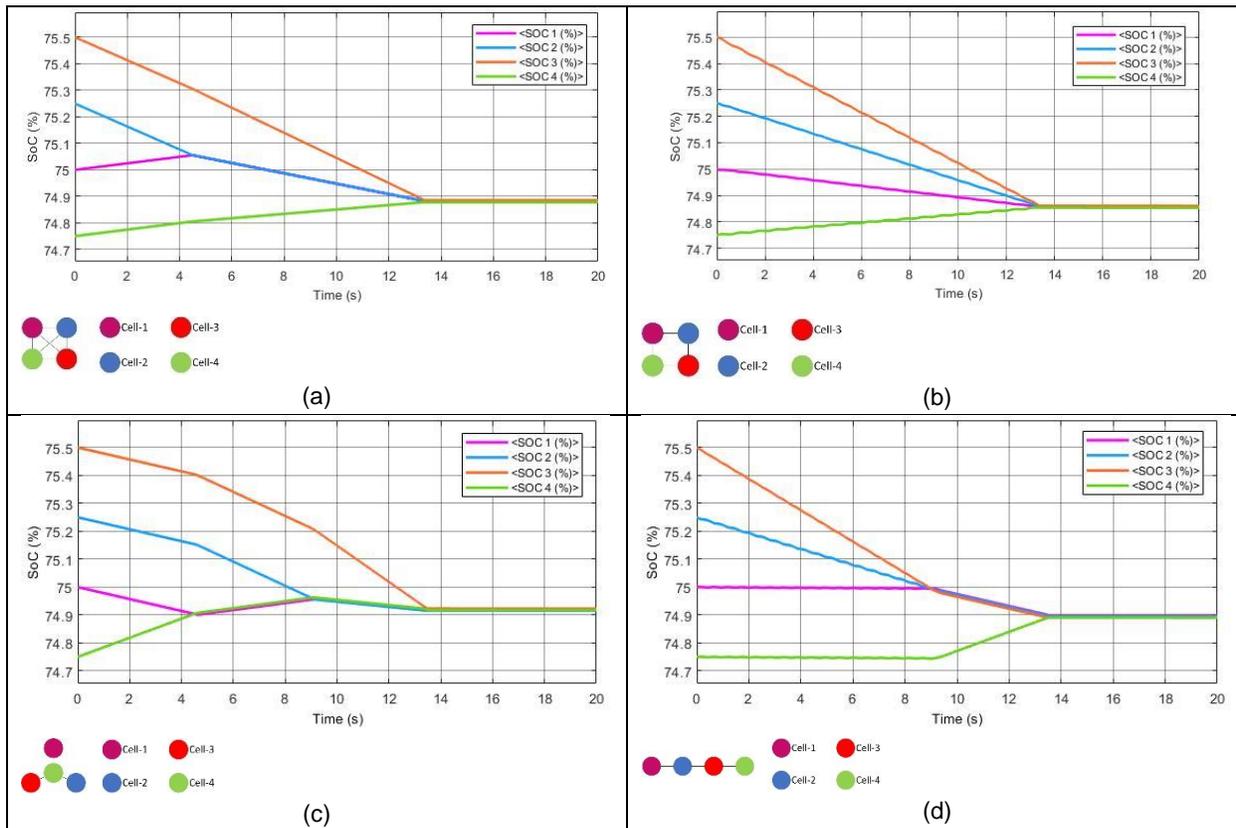
Gambar 4. Konvergensi SoC Setiap Cell Menggunakan Topologi Mesh

Pada dasarnya, tingkat konvergensi pada sistem yang dengan CA ditentukan pula oleh topologi yang digunakan. Pada kasus ini, pengujian awal dilakukan dengan *mesh* karena diasumsikan energi satu *cell* dipengaruhi oleh arus yang masuk pada *cell* tersebut dan *cell* lainnya pada satu *pack*. Pengujian selanjutnya adalah dengan merubah topologi sistem. Adapun beberapa topologi yang digunakan dalam pengujian selain *mesh* adalah topologi *ring*, *star* dan *line*. Perbedaan respon SoC pada masing-masing topologi ditunjukkan pada Gambar 5.

Berdasarkan Gambar 5 dapat diketahui bahwa waktu konvergensi t_{conv} SoC setiap *cell* dalam kondisi yang sama pada masing-masing topologi relatif sama. Hal tersebut menunjukkan bahwa perbedaan penggunaan topologi yang diujikan pada sistem tidak terlalu berdampak signifikan pada t_{conv} . Namun, dapat diketahui bahwa terdapat perbedaan nilai konstan sisa SoC setelah konvergen pada masing-masing topologi. Untuk lebih jelasnya, perbandingan nilai rata-rata SoC yang diambil mulai $t = 0s$ sampai $t = 20s$ dengan sample $50\mu s$ untuk setiap topologi ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Rata-rata SoC Setiap Topologi

No	Topologi	Rata-rata SoC (%)
1	<i>Mesh</i>	74.8820
2	<i>Ring</i>	74.8580
3	<i>Star</i>	74.9186
4	<i>Line</i>	74.8933



Gambar 5. Perbedaan Respon SoC pada Beberapa Topologi; (a) *Mesh*; (b) *Ring*; (c) *Star*; (d) *Line*

Berdasarkan data pada Tabel 2 dapat diketahui bahwa topologi *star* menghasilkan rata-rata tertinggi dibandingkan dengan topologi lainnya. Pada dasarnya, DCA pada sistem linier akan menghasilkan nilai rata-rata. Jika diberikan nilai rata-rata awal SoC $SoC_{ave} = 75.125\%$, maka berdasarkan pada Tabel 2 nilai konvergensi $SoC_{conv} \neq SoC_{ave}$. Dapat dikatakan bahwa untuk setiap topologi menghasilkan nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan rata-rata nilai awal SoC setiap *cell* atau $SoC_{conv} < SoC_{ave}$. Hal tersebut dapat terjadi karena nonlinieritas pada *battery*. Lebih dari itu, jika merujuk pada Gambar 5 dapat diketahui bahwa SoC_{ave} dengan topologi yang memiliki sedikit koneksi menghasilkan SoC_{ave} lebih dari topologi yang menggunakan lebih banyak koneksi. Hal tersebut terjadi karena konektivitas antar *cell* membutuhkan energi. Semakin kompleks topologi yang digunakan maka semakin besar energi yang dibutuhkan. Hubungan konektivitas tersebut dapat diketahui melalui matriks A .

6. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dapat diketahui bahwa sistem yang disusulkan efektif untuk menyeimbangkan energi setiap *cell*. Hal tersebut dapat diketahui dari SoC setiap *cell* mampu konvergen pada $t < 14s$ ketika pengujian awal menggunakan topologi *mesh*. Berdasarkan

topologi BMS yang diusulkan yaitu P2C dimana SoC dari satu *cell* dipengaruhi oleh arus yang masuk pada setiap *cell* di satu *pack*, pengujian juga dilakukan dengan topologi konektivitas selain *mesh*. Adapun topologi tersebut diantaranya *mesh*, *ring*, *star* dan *line*. Berdasarkan data hasil simulasi dapat diketahui bahwa topologi *star* menghasilkan SoC_{conv} paling besar jika dibandingkan dengan topologi lainnya. Hal tersebut dapat terjadi karena pengaruh kompleksitas dari topologi. Topologi dengan konektivitas yang kompleks cenderung menghasilkan SoC_{conv} yang lebih kecil dibandingkan dengan konektivitas sederhana. Adapun konektivitas topologi dapat diketahui melalui matriks A dari DCA. Hal tersebut menunjukkan semakin kompleks topologi yang digunakan, maka semakin besar energi yang akan terbuang. Meskipun DCA pada dasarnya akan menghasilkan nilai rata-rata dari nilai awal setiap sub-sistem, namun pada kasus penyeimbangan energi tidak demikian. Dapat dikatakan bahwa nilai konvergensi SoC_{conv} akan lebih kecil dibandingkan dengan rata-rata awal SoC setiap *cell*. Hal tersebut dapat terjadi karena pengaruh ketidak linieran pada *battery*.

Meskipun sistem yang diusulkan efektif untuk menyeimbangkan energi setiap *cell*, untuk penelitian lanjutan perlu dilakukan analisa terkait konvergensi sistem ketika kondisi *charging* maupun *discharging* pada *battery pack*. Analisa tersebut perlu dilakukan untuk mengetahui apakah sistem yang diusulkan mampu konvergen sebelum salah satu *cell* terjadi *over voltage* maupun *under voltage*.

Daftar Rujukan

- Abhinav, S., Binetti, G., Davoudi, A., Lewis, F.L., 2014. Toward consensus-based balancing of smart batteries, in: 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014. Presented at the 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014, IEEE, Fort Worth, TX, USA, pp. 2867–2873. <https://doi.org/10.1109/APEC.2014.6803711>
- Ahmad, A.B., Ooi, C.A., Ishak, D., Teh, J., 2019. Cell Balancing Topologies in Battery Energy Storage Systems: A Review, in: Zawawi, M.A.M., Teoh, S.S., Abdullah, N.B., Mohd Sazali, M.I.S. (Eds.), 10th International Conference on Robotics, Vision, Signal Processing and Power Applications, Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer Singapore, Singapore, pp. 159–165. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6447-1_20
- Feng Ran, Hao Xu, Yuan Ji, Jiaqi Qin, Wenhui Li, 2015. An active balancing circuit for lithium battery management system with optoelectronic switches, in: TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference. Presented at the TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference, IEEE, Macao, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/TENCON.2015.7373096>
- Gallardo-Lozano, J., Romero-Cadaval, E., Milanés-Montero, M.I., Guerrero-Martinez, M.A., 2014. Battery equalization active methods. *Journal of Power Sources* 246, 934–949. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.08.026>
- Goksu, O.F., Arabul, A.Y., Acar Vural, R., 2020. Low Voltage Battery Management System with Internal Adaptive Charger and Fuzzy Logic Controller. *Energies* 13, 2221. <https://doi.org/10.3390/en13092221>

- Hoque, M.M., Hannan, M.A., Mohamed, A., Ayob, A., 2017. Battery charge equalization controller in electric vehicle applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75, 1363–1385. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.126>
- Li, H., Peng, J., He, J., Huang, Z., Pan, J., Wang, J., 2018. Synchronized Cell-Balancing Charging of Supercapacitors: A Consensus-Based Approach. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 65, 8030–8040. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2798615>
- Li, S., Li, K., Xiao, E., Wong, C.-K., 2020. Joint SoC and SoH Estimation for Zinc–Nickel Single-Flow Batteries. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 67, 8484–8494. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2949534>
- Mehyar, M., Spanos, D., Pongsajapan, J., Low, S.H., Murray, R.M., 2007. Asynchronous Distributed Averaging on Communication Networks. *IEEE/ACM Trans. Networking* 15, 512–520. <https://doi.org/10.1109/TNET.2007.893226>
- Meng, L., Dragicevic, T., Roldan-Perez, J., Vasquez, J.C., Guerrero, J.M., 2016. Modeling and Sensitivity Study of Consensus Algorithm-Based Distributed Hierarchical Control for DC Microgrids. *IEEE Trans. Smart Grid* 7, 1504–1515. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2422714>
- Michael, Sujatmiko, R.P., Abuzairi, T., Rizkinia, M., Kurniawan, T.A., 2019. Design of Overcharging Protection and Passive Balancing Circuits Using Dioda for Lithium-Ion Battery Management System, in: 2019 16th International Conference on Quality in Research (QIR): International Symposium on Electrical and Computer Engineering. Presented at the 2019 16th International Conference on Quality in Research (QIR): International Symposium on Electrical and Computer Engineering, IEEE, Padang, Indonesia, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/QIR.2019.8898267>
- Momayyezani, M., Hredzak, B., Agelidis, V.G., 2016. Integrated Reconfigurable Converter Topology for High-Voltage Battery Systems. *IEEE Trans. Power Electron.* 31, 1968–1979. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2440441>
- Morstyn, T., Momayyezani, M., Hredzak, B., Agelidis, V.G., 2016. Distributed Control for State-of-Charge Balancing Between the Modules of a Reconfigurable Battery Energy Storage System. *IEEE Trans. Power Electron.* 31, 7986–7995. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2513777>
- Omariba, Z.B., Zhang, L., Sun, D., 2019. Review of Battery Cell Balancing Methodologies for Optimizing Battery Pack Performance in Electric Vehicles 7, 18.
- Perisoara, L.A., Guran, I.C., Costache, D.C., 2018. A Passive Battery Management System for Fast Balancing of Four LiFePO₄ Cells, in: 2018 IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME). Presented at the 2018 IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), IEEE, Iasi, pp. 390–393. <https://doi.org/10.1109/SIITME.2018.8599258>
- Ren, W., Beard, R.W., 2008. *Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control: theory and applications*, Communications and control engineering. Springer, London.
- Shang, Y., Cui, N., Zhang, C., 2019. An Optimized Any-Cell-to-Any-Cell Equalizer Based on Coupled Half-Bridge Converters for Series-Connected Battery Strings. *IEEE Trans. Power Electron.* 34, 8831–8841. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2888514>
- Wei, L., Jie, L., Wenji, S., Ziping, F., 2017. Study on passive balancing characteristics of serially connected lithium-ion battery string, in: 2017 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). Presented at the 2017 13th IEEE

- International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), IEEE, Yangzhou, China, pp. 489–495. <https://doi.org/10.1109/ICEMI.2017.8265862>
- Xia, B., Guo, S., Wang, W., Lai, Y., Wang, H., Wang, M., Zheng, W., 2018. A State of Charge Estimation Method Based on Adaptive Extended Kalman-Particle Filtering for Lithium-ion Batteries. *Energies* 11, 2755. <https://doi.org/10.3390/en11102755>
- Zheng, W., Xia, B., Wang, W., Lai, Y., Wang, M., Wang, H., 2019. State of Charge Estimation for Power Lithium-Ion Battery Using a Fuzzy Logic Sliding Mode Observer. *Energies* 12, 2491. <https://doi.org/10.3390/en12132491>