

Estimasi *State of Charge (SoC)* Ultrakapasitor menggunakan *Extended Kalman Filter* Berbasis *Ladder Equivalent Circuit Model*

ACHMAD AFANDI, NOVIE AYUB WINDARKO, BAMBANG SUMANTRI, HANIF HASYIER FAKHRUDDIN

Departemen Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya
Email : achmadafandi1025 @gmail.com

Received 22 Juni 2021 | *Revised* 29 Juli 2021 | *Accepted* 9 Agustus 2021

ABSTRAK

Penggunaan perangkat penyimpan energi semakin lama semakin meningkat pada peralatan berdaya kecil maupun besar. Baterai selama ini menjadi pilihan utama sebagai penyimpan energi. Namun akhir-akhir ini ultrakapasitor menjadi pilihan alternatif karena lifetime lebih panjang dan respon daya sesaat yang jauh lebih besar dari baterai. Pada manuskrip ini dibahas tentang estimasi nilai State of Charge (SoC) pada ultrakapasitor. Estimasi dilakukan berdasarkan rangkaian ekivalen ladder. Extended Kalman Filter adalah metode estimasi yang handal terhadap sistem dinamis dan tidak memerlukan banyak memori. Estimasi menggunakan metode Extended Kalman filter yang ditanamkan pada sistem embedded untuk mengantisipasi kondisi non-linier pada ultrakapasitor. Ultrakapasitor diuji dengan kondisi charging dan discharging. Hasil pengujian menunjukkan, kinerja metode dibandingkan antara data simulasi dan percobaan dengan perbedaan hasil sebesar 6%.

Kata kunci: *State of Charge, Metode Extended Kalman Filter, Ultrakapasitor*

ABSTRACT

The use of energy storage devices is increasing in both small and large power equipment. Batteries have been the main choice for energy storage. However, recently ultracapacitors have become an alternative choice because of a longer lifetime and a much larger instantaneous power response than batteries. This manuscript discusses the estimation of the State of Charge (SoC) value on the ultracapacitor. Estimates are made based on a ladder equivalent circuit. Extended Kalman Filter is a reliable estimation method for dynamic systems and does not require a lot of memory. The estimation uses the Extended Kalman filter method implemented in embedded system to anticipate non-linear conditions on the ultracapacitor. Ultracapacitors were tested under charging and discharging conditions. The test results show that the performance of the method is compared between simulation and experimental data with a difference of 6% in results.

Keywords: *State of Charge, Metode Extended Kalman Filter, Ultrakapasitor*

1. PENDAHULUAN

Tren perangkat elektronik berdaya rendah telah menjalar dalam teknologi penyimpanan energi. Ultrakapasitor adalah kapasitor yang memiliki nilai kapasitansi lebih tinggi dari kapasitor lain yang menawarkan kepadatan daya yang tinggi (**Zhang, dkk, 2014**) (**Tian, dkk, 2019**). Ini dapat diukur sebagai kapasitor elektrolit (biasa) dan baterai yang dapat diisi ulang. Energi, daya, masa pakai, keandalan, dan keamanan adalah kriteria utama saat memilih perangkat penyimpanan energi (**Zhang, dkk, 2018**) (**Chiang, dkk, 2013**). Teknologi ultrakapasitor memiliki semua kriteria ini. Teknologi dimulai lebih dari empat puluh tahun yang lalu di laboratorium Sohio Corporation. Untuk memastikan operasi sistem ultrakapasitor yang aman, andal, dan efisien, estimasi SoC yang tepat memainkan peran penting (**Pozo, dkk, 2018**) (**Mastali, dkk, 2013**). Misalnya, pemantauan SoC yang akurat selalu memfasilitasi eksploitasi daya dan energi ultrakapasitor yang memadai tanpa menyebabkan *over-charge / over-discharge* yang merugikan atau kondisi yang merusak saat beroperasi (**Yan, dkk, 2018**) (**Ceraolo, dkk, 2017**).

Karena konstruksi material dan struktur desainnya, ultrakapasitor memiliki kepadatan daya tinggi dan resistansi rendah. Karakteristik ini mengarah pada efisiensi yang lebih tinggi, arus yang lebih besar dalam kapasitas pelepasan muatan, dan kehilangan daya pemanas yang rendah (**Afandi, dkk, 2020**). Ultrakapasitors sangat cocok untuk digunakan dalam kondisi aplikasi yang ekstrem karena suhunya yang lebih luas dan siklus masa pakai yang lama dalam siklus pelepasan muatan (**Pavkovic, dkk, 2014**). Akhirnya, ultrakapasitors dapat diisi dan dikosongkan secara mendalam, sehingga risiko pengisian berlebih dan pemakaian berlebih pada ultrakapasitor lebih kecil daripada perangkat penyimpanan energi lainnya (**Houlian & Gongbo, 2018**).

Untuk mengestimasi SoC dari ultrakapasitor diperlukan *framework* dalam mendeskripsikan dan menganalisis sistem. Kerangka kerjanya sering kali berupa pemodelan matematika. Untuk perilaku kelistrikan, kerangka umumnya menggunakan model rangkaian ekuivalen (**Sepasi, dkk, 2014**) (**Saha, dkk, 2020**). Pemodelan bertujuan untuk estimasi termasuk SoC dalam sistem penyimpanan energi, pemantauan kendali, dan sintesis kendali. Penelitian ini menggunakan model rangkaian ekuivalen *ladder*. Disebut *ladder* karena bentuk dari rangkaianannya seperti sebuah anak tangga dengan menggunakan komponen elektronik umum seperti resistor dan kapasitor. Ada tiga resistor dan dua kapasitor dalam model rangkaian ekuivalen klasik. Resistor pertama sudah terpasang seri dengan resistor kedua, sedangkan resistor ketiga dipasang secara paralel dengan kapasitor 1 dan kapasitor 2. Resistor pertama adalah resistansi internal ultrakapasitor, resistor ketiga digunakan untuk kondisi *self-discharging* dan kapasitor digunakan untuk menyimpan daya sementara. Komposisi dan akurasi pemodelan yang digunakan memiliki akurasi laju yang tinggi dan efisiensi penghitungan laju yang rendah karena dapat menangkap proses nyata di dalam ultrakapasitor dengan mengabaikan persamaan *Paired Differential Equation* (PDE) (**Zhou, dkk, 2017**). Pemodelan ini membuatnya dapat diterima dengan baik untuk sistem manajemen penyimpanan energi secara *real-time*. Hal tersebut terkait dengan perkembangan teknologi yang mengedepankan perangkat elektronik berdaya rendah, khususnya pada sistem penyimpanan energi.

Selain pemodelan ultrakapasitor di atas, untuk mendapatkan hasil terbaik dari estimasi SoC ultrakapasitor digunakan metode estimasi. Beberapa metode estimasi SoC telah dipelajari, antara lain metode *Ampere-hour* (Ah), metode *Open Circuit Voltage* (OCV), metode Kalman, dan metode algoritma cerdas (**Cabrane, dkk, 2017**) (**Richardson, dkk, 2015**). Filter Kalman ideal untuk kondisi sistem dinamis. Keuntungan filter ada di memori. Metode Kalman

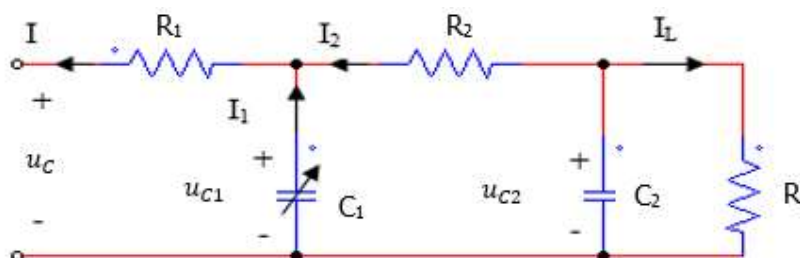
tidak membutuhkan memori penyimpanan yang besar, karena algoritma tidak membutuhkan penyimpanan untuk data yang lalu. Jadi metode ini ideal untuk menyelesaikan masalah dalam sistem *embedded*. Ini adalah metode yang baik untuk sistem elektronik berdaya rendah. Metode Kalman memiliki beberapa jenis. Beberapa di antaranya adalah *Extended Kalman Filter* (EKF) dan *Ensemble Kalman Filter* (EnKF). Diskusi berfokus pada EKF. EKF adalah Filter Kalman yang diperluas adalah tipe dinamis dari kelompok filter Kalman yang melinierisasi perkiraan. Dengan kata lain, EKF adalah algoritma untuk memperkirakan atau estimasi nilai berikutnya dari suatu sistem dinamis berdasarkan data yang ada sebelumnya. Kelebihan dari EKF adalah mampu melakukan estimasi suatu nilai dari sistem yang berubah-ubah atau dinamis, tidak memerlukan banyak memori. Jadi algoritma EKF adalah salah satu metode terbaik untuk memperkirakan atau estimasi dari sistem pada penelitian ini.

Pengujian dalam penelitian ini menggunakan model Rangkaian Ekivalen *ladder* dan EKF sebagai metode estimasi SoC. Hasil simulasi tersebut akan dibandingkan dengan data eksperimen yang telah dilakukan di laboratorium. Kondisi pengisian menggunakan metode arus konstan dan untuk estimasi menggunakan aplikasi simulasi daya *Power Simulation* (PSIM). Penelitian ini memiliki tiga hasil, yaitu : hasil pertama adalah estimasi matematis berdasarkan rangkaian ekivalen klasik, hasil kedua adalah simulasi menggunakan metode EKF pada aplikasi software PSIM, dan yang ketiga berdasarkan data eksperimen.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Perancangan Rangkaian *Ladder Equivalent Circuit* pada Perangkat Lunak *Power Simulator*

Bagian yang terpenting pada penelitian ini adalah pembuatan rangkaian *ladder equivalent circuit*. Rangkaian *ladder equivalent circuit* terdiri dari tiga resistor dan dua kapasitor dalam penelitian Zhang bisa menggambarkan karakteristik dari ultrakapasitor. Pada penelitiannya menyatakan bahwa rangkaian menggunakan tiga resistor dan dua kapasitor memiliki keunggulan dalam bidang estimasi SoC sistem dinamis dibandingkan dengan rangkaian yang pernah ada sebelumnya (Zhang, 2018). Pada penelitian ini, rangkaian tersebut dirangkai menggunakan *Power Simulator* (PSIM) seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian *Ladder Equivalent Circuit*

Keterangan:	I	= Arus total	I_1	= Arus 1
	I_2	= Arus 2	I_L	= Arus RL
	R_1	= Resistor 1 (resistansi internal)	R_2	= Resistor 2
	R_L	= <i>Self Discharging load</i>	u_C	= Tegangan masuk
	u_{C1}	= Tegangan pada C_1	u_{C2}	= Tegangan pada C_2
	C_1	= Kapasitor (nilai berubah)	C_2	= Kapasitor 2

Rangkaian *ladder equivalent circuit model* pada Gambar 1 adalah rangkaian yang telah dimodifikasi dengan C_1 sebagai komponen yang nilai kapasitansinya bersifat adaptif. Nilai dari C_1 berdasarkan nilai tegangan pada u_{C1} . Simbol R_2 mewakili resistansi redistribusi muatan, C_2 adalah pengisian kapasitansi redistribusi, R_L mewakili *self-discharge* dari ultrakapasitor. Persamaan untuk menghitung pengisian muatan pada ultrakapasitor dapat dituliskan pada Persamaan (1).

$$Q_c = C_1(u_{C1})u_{C1} + C_2u_{C2} \quad (1)$$

Dimana u_{C1} adalah tegangan dari C_1 , $C_1(u_{C1})$ kapasitas diferensial dari tegangan u_{C1} , u_{C2} adalah tegangan dari C_2 .

Sementara persamaan untuk menghitung kapasitas dari ultrakapasitor dituliskan pada Persamaan (2).

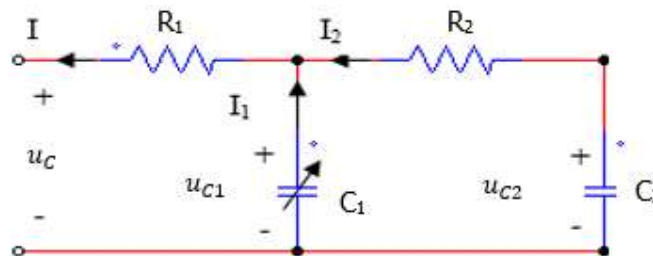
$$Q_{cN} = (C_1(u_N) + C_2)u_N \quad (2)$$

Dimana u_N adalah rasio tegangan, $C_1(u_N)$ adalah kapasitas diferensial pada tegangan u_N .

SoC dari ultrakapasitor dituliskan pada Persamaan (3).

$$SoC = \frac{Q_c}{Q_{cN}} = \frac{C_1(u_{C1})u_{C1} + C_2u_{C2}}{(C_1(u_N) + C_2)u_N} \times 100\% \quad (3)$$

Pada pemodelan ultrakapasitor pada Gambar 1, *self discharging* (R_L) dianggap sangat kecil sehingga bisa diabaikan. Sehingga pemodelan rangkaian ekuivalennya menjadi seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian *Ladder Equivalent Circuit* tanpa R_L

Tujuan dari model *state space* ini adalah mengestimasi SoC ultrakapasitor dimana masukannya adalah i , dan keluarannya adalah u_{C1} , u_{C2} .

Sebelum melakukan estimasi, terlebih dahulu mencari persamaan \dot{u}_{C1} . Dari Gambar 2 digunakan hukum kirchoff I (KCL) pada titik A, sehingga didapatkan Persamaan (4).

$$i = i_1 + i_2$$

$$i = C_1 \frac{du_{C1}}{dt} + \left(\frac{u_{C1} - u_{C2}}{R_2} \right)$$

$$i = C_1 \frac{du_{C1}}{dt} + \left(\frac{u_{C1}}{R_2} - \frac{u_{C2}}{R_2} \right)$$

Estimasi *State of Charge (SoC)* Ultrakapasitor menggunakan *Extended Kalman Filter* Berbasis *Ladder Equivalent Circuit Model*

$$\begin{aligned}
 C_1 \frac{du_{C1}}{dt} &= i - \frac{u_{C1}}{R_2} - \frac{u_{C2}}{R_2} \\
 \frac{du_{C1}}{dt} &= \frac{1}{C_1} i - \frac{u_{C1}}{C_1 R_2} - \frac{u_{C2}}{C_1 R_2} \\
 \dot{u}_{C1} &= -\frac{1}{C_1 R_2} u_{C1} + \frac{1}{C_1 R_2} u_{C2} + \frac{1}{C_1} i
 \end{aligned} \tag{4}$$

Selanjutnya adalah mencari persamaan \dot{u}_{C2} . Dari Gambar 2 digunakan hukum kirchoff II (KVL) sehingga didapatkan Persamaan (5).

$$\begin{aligned}
 -u_{C1} + u_{R2} + u_{C2} &= 0 \\
 u_{R2} &= u_{C1} - u_{C2} \\
 R_2 \cdot i_2 &= u_{C1} - u_{C2} \\
 R_2 \cdot C_2 \cdot \dot{u}_{C2} &= u_{C1} - u_{C2} \\
 \dot{u}_{C2} &= \frac{u_{C1}}{C_2 R_2} - \frac{u_{C2}}{C_2 R_2}
 \end{aligned} \tag{5}$$

Persamaan *state space* dari rangkaian *ladder* pada Gambar 1. Bentuk *state space* dari rangkaian ini dituliskan pada Persamaan (6).

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{u}_{C1} \\ \dot{u}_{C2} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_1 R_2} & \frac{1}{C_1 R_2} \\ \frac{1}{C_2 R_2} & -\frac{1}{C_2 R_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{C1} \\ u_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ 0 \end{bmatrix} i \\
 SoC &= [C_1 \quad C_2] \begin{bmatrix} u_{C1} \\ u_{C2} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{6}$$

Dimana $u_{C1} = u_c - IR_1$, u_c adalah terminal tegangan dari ultrakapasitor.

Sebelum melakukan estimasi, parameter dari rangkaian *ladder* pada Gambar 2 harus diidentifikasi. Identifikasi yang harus dilakukan adalah C_1 . Hal ini dilakukan karena nilai dari C_1 bersifat adaptif. Untuk mengidentifikasi nilai C_1 dituliskan pada Persamaan (7).

$$C_1 = C_0 + K u_{c1} \tag{7}$$

Dimana C_0 adalah kapasitansi awal dan K adalah koefisien.

Perhitungan secara matematis dari ultrakapasitor dijelaskan oleh Persamaan (1) dan (2), persamaan untuk SoC pada Persamaan (3), persamaan *state space* pada Persamaan (4),(5),(6) dan untuk identifikasi parameter rangkaian *ladder* dijelaskan pada Persamaan (7). Sementara untuk spesifikasi ultrakapasitor yang digunakan pada percobaan di laboratorium ditunjukkan pada Tabel 1. Ultrakapasitor yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.

Tabel 1. Spesifikasi Ultrakapasitor

Kapasitas (Farad)	4.7
Tegangan masukan (Volt)	2.6V
Arus masukan (Ampere)	0.105



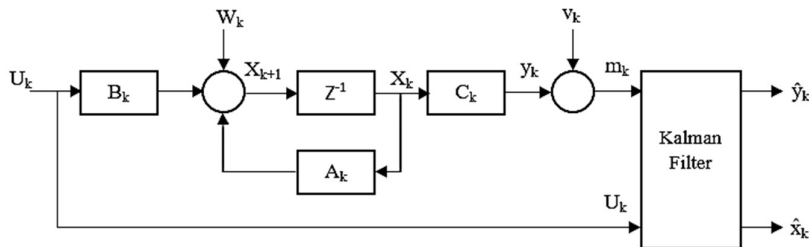
Gambar 3. Ultrakapasitor Sebagai Objek yang Digunakan

2.2 Perancangan Metode Estimasi *Extended Kalman Filter* (EKF)

Extended Kalman Filter (EKF) adalah metode estimasi yang biasa digunakan untuk menganalisis dan mengestimasi suatu kondisi dari sistem dinamis. Alasan metode tersebut sering digunakan adalah karena memiliki tingkat akurasi tinggi dan cenderung mudah digunakan. Kelebihan dari fitur metode *Extended Kalman Filter* adalah memberikan batas kesalahan estimasi pada sistem secara otomatis. Bentuk umum persamaan matematis dari *Extended Kalman Filter* dituliskan dalam Persamaan (8).

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, i_c) + w \\ y_k = Hx_k + v_k \\ w \sim (0, \Sigma_w) \\ v_k \sim (0, \Sigma_{v_k}) \end{cases} \quad (8)$$

Dimana i_c adalah masukan dari sistem, w adalah *process noise* yang diasumsikan dengan *Gaussian-disturbance* dengan *zero-mean* dan kovarian dari Σ_w , v_k adalah *measurement noise* dengan *Gaussian-disturbance* dengan *zero-mean* dan kovarian dari Σ_{v_k} , H adalah keluaran matrix, dan y_k adalah pengukuran keluaran. Ilustrasi dari metode *Extended Kalman Filter* ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram Blok Sistem menggunakan *Extended Kalman Filter*

Gambar 4 adalah sebuah sistem dengan *discrete-time* linier. Masukan dari sistem adalah i_k , dan keluarannya adalah y_k . Simbol A_k, B_k, C_k adalah matriks pembangunnya, z^{-1} adalah *unit-delay*. Ada dua *noise* yang mendistorsi sistemnya, yaitu *process-noise* yang ditunjukkan oleh w_k dan *measurement-noise* yang ditunjukkan oleh v_k . Diasumsikan bahwa *noise* pada sistem tersebut adalah *white-noise*, dan keluarannya diukur oleh perangkat yang lain. Hasil pengukuran ditunjukkan oleh m_k terdistorsi oleh v_k . Simbol x_k adalah *system-state*. Nilai dari x_k tidak diketahui dan bisa diestimasi oleh *Extended Kalman Filter*. Dari Gambar 2 bisa didapatkan dua persamaan. Persamaan yang pertama mendeskripsikan tentang *state-equation*, dan persamaan yang kedua mendeskripsikan *measurement-equation*.

Persamaan yang pertama ditunjukkan pada Persamaan (9).

$$X_{k+1} = A_k X_k + B_k i_k + w_k \quad (9)$$

Diasumsikan w_k adalah aditif dengan *zero-mean* dan matriks kovarian, sehingga *process-noise* dari w_k adalah,

$$E[w_n w_k^T] = \begin{cases} \Sigma_w, n = k \\ 0, n \neq k \end{cases} \quad (10)$$

Persamaan yang kedua ditunjukkan pada Persamaan (11).

$$m_k = y_k + v_k \quad (11)$$

Kemudian mengganti y_k menjadi,

$$m_k = C_k x_k + v_k \quad (12)$$

Persamaan (12) menunjukkan bahwa keluaran dengan indeks *discrete-time* k mempunyai kombinasi yang linier dengan kondisi x_k dan matriks C_k . Keluaran dari m_k termasuk *measurement-noise* dari v_k dituliskan pada Persamaan (13).

$$E[v_n v_k^n] = \begin{cases} \Sigma_v, n = k \\ 0, n \neq k \end{cases} \quad (13)$$

Persamaan pengukuran dari Gambar 2 dituliskan pada Persamaan (14).

$$m = V_{t(k)} = x_k + i_k R_s \quad (14)$$

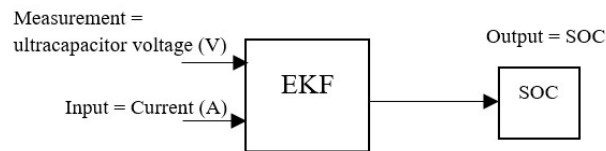
Variabel m menunjukkan nilai terukur dari keluaran y_k , $V_{t(k)}$ adalah tegangan dari ultrakapasitor, x_k adalah *system-state*, i_k adalah masukan, dan R_s adalah resistansi.

Persamaan *Extended Kalman filter* dari Gambar 2 ditunjukkan pada Persamaan (15) untuk C_1 dan Persamaan (16) C_2 .

$$U_{C1(k+1)} = U_{C1(k)} - \left[\left(-\frac{1}{C_1 R_2} U_{C1(k)} + \frac{1}{C_1 R_2} U_{C2(k)} \right) + \frac{I}{C_1} \right] T \quad (15)$$

$$U_{C2(k+1)} = U_{C2(k)} - \left(-\frac{1}{C_2 R_2} U_{C1(k)} + \frac{1}{C_2 R_2} U_{C2(k)} \right) T \quad (16)$$

Dari Persamaan (15) dan (16) digunakan untuk menentukan keluaran dari sistem. Gambar (4) mengilustrasikan cara kerja dari sistem pada penelitian ini.

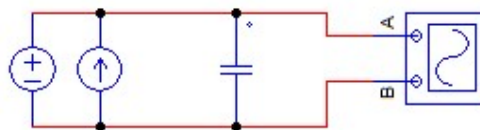


Gambar 5. Sistem dengan *Extended Kalman Filter*

Gambar 5 menunjukkan ilustrasi dari Persamaan (15) dan (16). Masukan dari *Extended Kalman Filter* adalah tegangan dan arus. Ketika data tegangan dan arus sudah didapatkan, maka data tersebut akan diproses kedalam *Extended Kalman Filter* untuk memperoleh nilai keluaran. Nilai keluaran dari sistem adalah SoC.

2.3 Pengambilan Data Percobaan

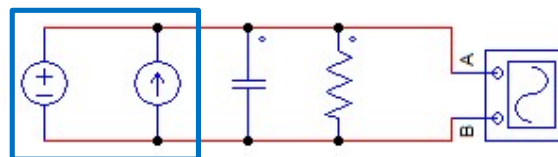
Dalam pengambilan data percobaan yang dilakukan di laboratorium adalah dengan menggunakan ultrakapasitor sebagai objek utama, catu daya DC, kabel *probe* tegangan, kabel *probe* arus, osiloskop, dan DC *electronic load*. Rangkaian pada saat pengambilan data pada kondisi pengisian ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Rangkaian Pengambilan Data pada Kondisi Pengisian

Catu daya yang telah diatur tegangan sebesar 2.65 V dan arus sebesar 0.105 A disambungkan dengan ultrakapasitor untuk mengisi muatan. Kemudian ultrakapasitor disambungkan dengan osiloskop menggunakan kabel *probe* tegangan dan kabel *probe* arus untuk merekam data pada saat kondisi pengisian muatan.

Rangkaian pada saat pengambilan data pada kondisi pengosongan muatan ditunjukkan pada Gambar 7.

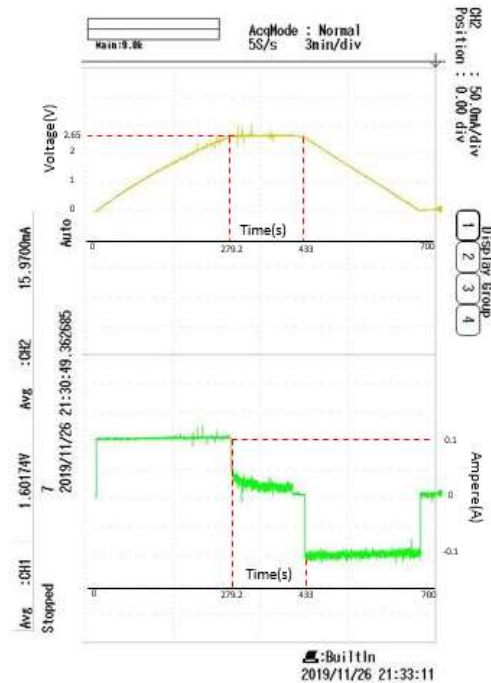


Gambar 7. Rangkaian Pengambilan Data pada Kondisi Pengosongan

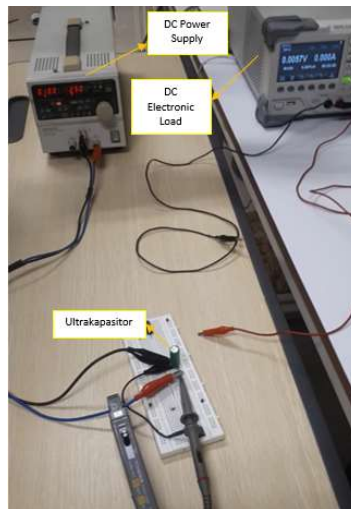
Catu daya yang semula tersambung dengan ultrakapasitor untuk mengisi muatan, dilepas kemudian ultrakapasitor yang dalam kondisi muatan penuh disambungkan dengan DC *electronic load* untuk proses pengosongan muatan. DC *electronic load* di atur sebesar 25 Ω dengan arus sebesar 0.105 A. Kemudian ultrakapasitor disambungkan dengan osiloskop menggunakan kabel *probe* tegangan dan kabel *probe* arus untuk merekam data pada saat kondisi pengisian muatan.

Estimasi *State of Charge (SoC)* Ultrakapasitor menggunakan *Extended Kalman Filter* Berbasis *Ladder Equivalent Circuit Model*

Pengambilan data percobaan di laboratorium ditunjukkan pada Gambar 8 dan Gambar 9.



Gambar 8. Tampilan Hasil Rekaman Osiloskop



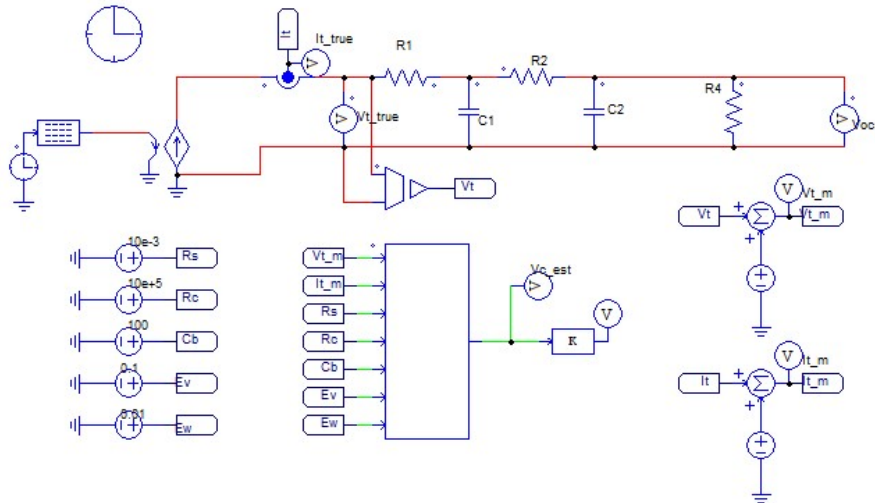
Gambar 9. Rangkaian Pengambilan Data Percobaan

Gambar 8 adalah hasil dari data yang direkam menggunakan osiloskop. Gambar 9 menunjukkan percobaan yang pengambilan data yang dilakukan di dalam laboratorium sebagai bukti bahwa percobaan benar-benar dilakukan.

3. PENGUJIAN DAN ANALISIS

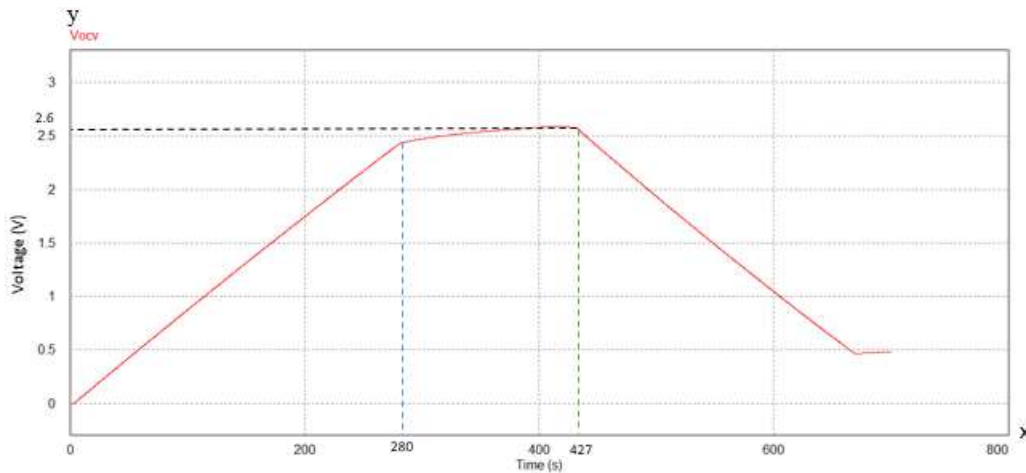
3.1 Pengujian *Extended Kalman Filter* (EKF)

Pengujian *Extended Kalman Filter* sebagai metode estimasi ultrakapasitor dilakukan dengan membuat simulasi menggunakan PSIM. Dari hasil simulasi kemudian akan dibandingkan dengan hasil data percobaan yang telah dilakukan. Rangkaian untuk simulasi *Extended Kalman Filter* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Rangkaian Metode Estimasi *Extended Kalman Filter*

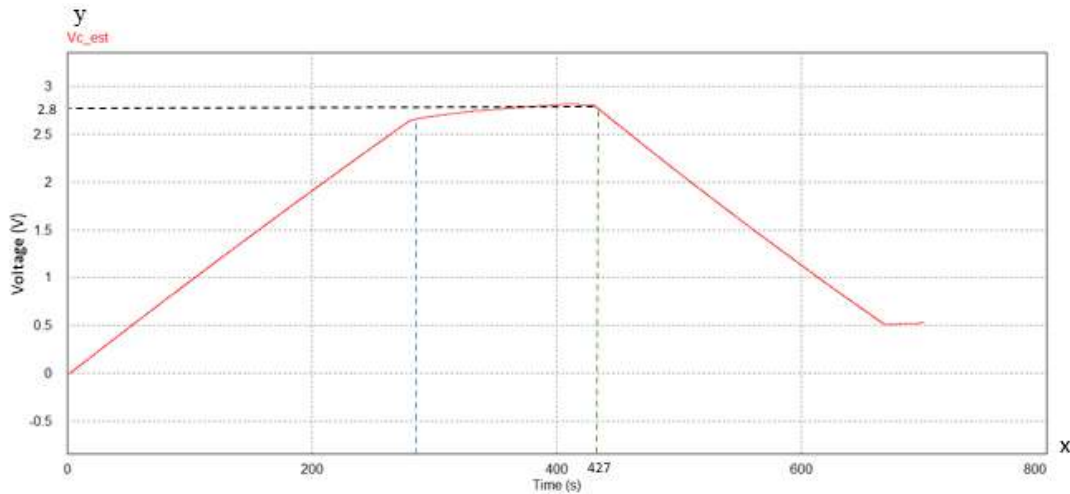
Data percobaan diubah ke dalam bentuk *lookup table*, kemudian dihubungkan dengan sumber untuk memperoleh hasil dari *extended Kalman filter*. Persamaan dari *extended Kalman filter* pada Persamaan (15) dan (16) dikonversi kedalam bentuk program dan dimasukkan kedalam *C-block* dari PSIM. Kemudian membuat rangkaian berdasarkan pemodelan *ladder equivalent circuit* dan dihubungkan dengan sensor arus dan sensor tegangan. *Gain* dari *extended Kalman filter* dihubungkan dengan persamaan pengendali pada *C-block* sehingga proses estimasi dapat berjalan. Hasil dari simulasi estimasi menggunakan *extended Kalman filter* meliputi grafik V_{OCV} , V_{C_est} , V_{t_m} , dan SoC. Hasil dari V_{OCV} dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Hasil Grafik V_{OCV}

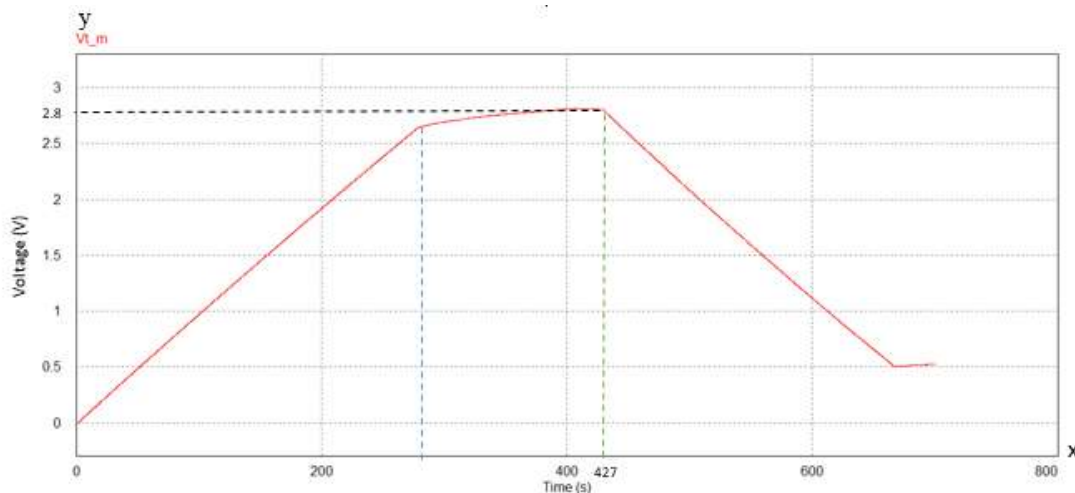
Estimasi *State of Charge (SoC)* Ultrakapasitor menggunakan *Extended Kalman Filter* Berbasis *Ladder Equivalent Circuit Model*

V_{OCV} atau tegangan *open circuit voltage* atau tegangan rangkaian terbuka menunjukkan keluaran dari sistem. Hasilnya menunjukkan bahwa tegangan tidak melebihi batas tegangan ultrakapasitor. Dari Gambar 11 dapat dilihat bahwa nilai tegangan V_{OCV} sebesar 2.6 V, sedangkan batas tegangan dari ultrakapasitor adalah 2.65 V. Grafik V_{OCV} menunjukkan kenaikan tegangan yang mulai melambat pada detik ke 280 s hingga detik ke 427 s kemudian mengalami penurunan tegangan karena dipengaruhi oleh kondisi pengosongan.



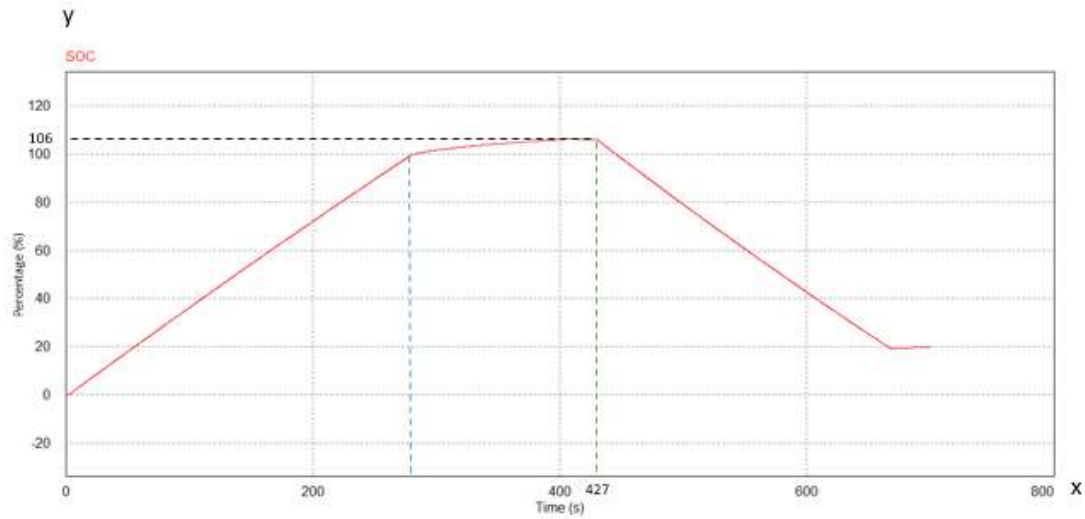
Gambar 12. Hasil Grafik V_{C_est}

V_{C_est} atau tegangan estimasi adalah estimasi tegangan dari simulasi *extended Kalman filter*. Grafik dari Gambar 12 memiliki pola grafik yang sama dengan Gambar 11. Hanya saja nilai puncak dari V_{C_est} menunjukkan nilai sebesar 2.8 V yang melebihi batas dari tegangan ultrakapasitor yang sebesar 2.65 V. Hal ini dipengaruhi oleh pembulatan nilai dari setiap perhitungan yang dilakukan pada persamaan yang telah digunakan.



Gambar 13. Hasil Grafik V_{t_m}

V_{t_m} adalah tegangan terukur dari simulasi *extended Kalman filter*. Hasilnya menunjukkan grafik dan nilai yang sama dengan V_{C_est} pada Gambar 12. Nilai tegangannya sebesar 2.8 V yang melebihi batas dari tegangan ultrakapasitor yang hanya sebesar 2.65 V.

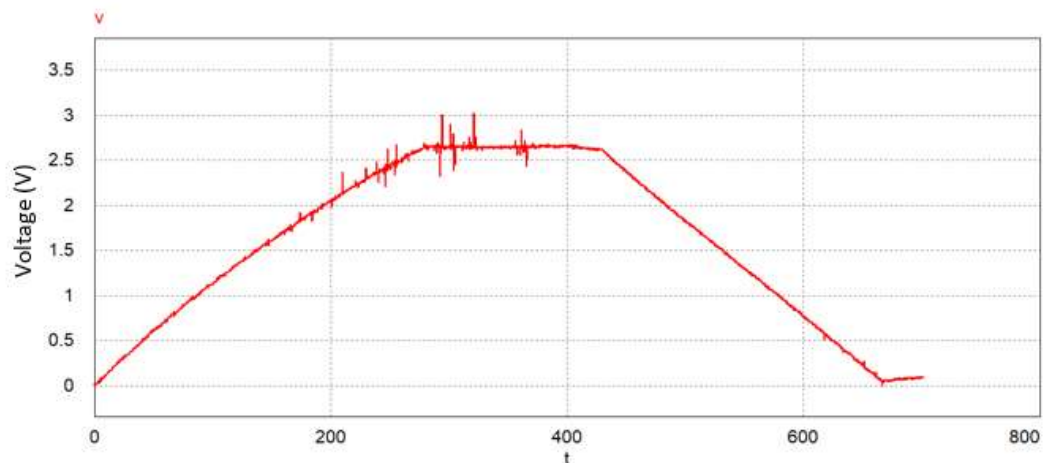


Gambar 14. Hasil Grafik SoC

SoC adalah hasil akhir dari sistem ini. Dari Gambar 14 dapat diketahui bahwa hasil estimasi SoC dari simulasi menggunakan metode *extended Kalman filter* sebesar 106 %. Jika diasumsikan secara nilai presentasi, maka seharusnya ketepatan estimasi adalah 100 %. Sehingga bisa diketahui bahwa nilai *error* dari sistem ini adalah sebesar 6 %. Nilai *error* tersebut muncul karena adanya pembulatan nilai perhitungan pada semua persamaan yang digunakan pada penelitian ini, termasuk perhitungan setiap komponen dan parameter pada pemodelan *ladder equivalent circuit*.

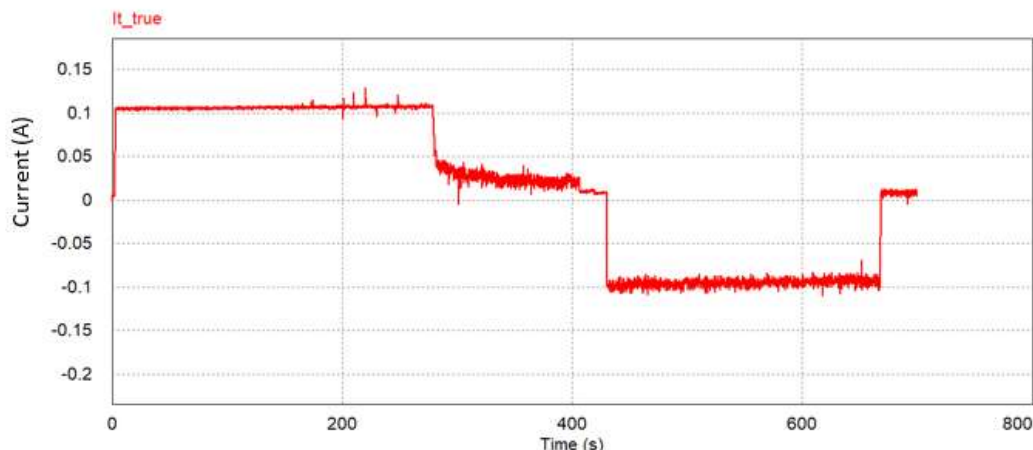
3.2 Pengujian Pengambilan Data Percobaan

Hasil dari data percobaan nantinya akan dikomparasi dengan hasil simulasi. Nilai *error* sistem di dapat dari perhitungan antara data percobaan dan hasil simulasi. Metode pengambilan data percobaan yang dilakukan adalah menggunakan metode *Constant Current (CC)*. Hasil dari data percobaan pada Gambar 8 dikonversikan kedalam bentuk *look-up table* kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik. Hasil grafik *look-up table* dari Gambar 8 ditunjukkan pada Gambar 15 dan 16.



Gambar 15. Grafik Tegangan (V) Terhadap Waktu (s) dari Hasil Data Percobaan

Dari Gambar 15 dapat dilihat bahwa ketika ultrakapasitor berada di kondisi pengisian, ultrakapasitor akan mengalami kenaikan tegangan. Kenaikan tegangan terus terjadi sampai muatan pada ultrakapasitor penuh. Ketika muatan ultrakapasitor penuh, maka nilai tegangan akan stabil. Dengan mengacu pada Tabel 1, kondisi muatan penuh dari ultrakapasitor adalah 2.65 V pada detik ke 279.2 s. Ketika ultrakapasitor mengalami pengosongan, maka grafik akan mengalami penurunan hingga mencapai nilai awal dari ultrakapasitor.



Gambar 16. Grafik Arus (A) Terhadap Waktu (s) dari Hasil Data Percobaan

Dari Gambar 16 dapat dilihat bahwa grafiknya stabil kemudian menurun. Ketika ultrakapasitor pada kondisi pengisian, ultrakapasitor akan terisi dengan muatan termasuk tegangan dan arus. Grafik awal menunjukkan kondisi yang stabil hingga muatan ultrakapasitor penuh pada detik ke 279.2 s dengan nilai 0.1 A. Kemudian grafik mengalami penurunan dengan menunjukkan nilai 0 A ketika muatan sudah penuh. Ketika ultrakapasitor mengalami pengosongan, maka grafik akan mengalami penurunan lagi dengan menunjukkan nilai -0.1 A. Nilai pada saat pengosongan terlihat minus akibat dari efek arus balik. Ketika muatan ultrakapasitor telah habis, grafik akan kembali stabil.

4. KESIMPULAN

Sebuah sistem yang dibangun pada penelitian ini adalah sistem estimasi SoC pada perangkat ultrakapasitor. Metode yang digunakan adalah metode *extended Kalman filter* dimana metode tersebut adalah metode yang sering digunakan untuk mengestimasi keluaran suatu sistem dinamis. Proses estimasi pada penelitian ini juga melibatkan sebuah pemodelan *ladder equivalent circuit*. Pemodelan *ladder* menggunakan komponen dasar elektronika yaitu 3 resistor dan 2 kapasitor. Validasi pemodelan *ladder* dan perancangan estimasi *extended Kalman filter* pada penelitian ini dilakukan didalam aplikasi PSIM. Pengambilan data percobaan menggunakan ultrakapasitor sebagai objek utama, catu daya untuk suplai daya pada saat pengisian muatan, *DC electronic load* untuk pengosongan muatan, dan osiloskop untuk merekam data percobaan. Lonjakan nilai tegangan dan arus pada Gambar 15 dan Gambar 16 dikarenakan oleh penggunaan kabel *probe* dengan batas yang tidak sesuai dengan objek yang diukur sehingga menyebabkan banyak lonjakan nilai arus dan tegangan yang terbaca. Dari hasil simulasi yang telah dilakukan, *error* dari SoC adalah sebesar 6 %. Nilai *error* sebesar 6 % tersebut muncul akibat pembulatan nilai dari perhitungan persamaan-persamaan yang digunakan.

DAFTAR RUJUKAN

- Afandi, A., Sumantri, B., & Windarko, N. A. (2020). Estimation state of charge (soc) of ultracapacitor based on classical equivalent circuit using extended Kalman filter. *IES 2020 - Int. Electron. Symp. Role Auton. Intell. Syst. Hum. Life Comf.*, (pp. 31–36).
- Cabrane, Z., Ouassaid, M., & Maaroufi, M. (2017). Battery and supercapacitor for photovoltaic energy storage: a fuzzy logic management . *IET Renewable Power Generation*, *11*(8), 1157–1165.
- Ceraolo, M., Lutzenberger, G., & Poli, D. (2017). State-Of-Charge Evaluation Of Supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, *11*, 211–218.
- Chiang, C. J., Yang, J. L., & Cheng, W. C. (2013). Temperature and state of charge estimation in ultracapacitor based on extended Kalman filter. *J. Power Sources*, vol. *234*, pp. 234–243.
- Houlian, W., & Gongbo, Z. (2018). State of charge prediction of supercapacitors via combination of Kalman filtering and backpropagation neural network . *IET Electric Power Applications*, *12*(4), 588–594.
- Mastali, M., Vazquez-Arenas, J. R., Fraser, Fowler, M., Afshar, S., & Stevens, M. (2013) Battery state of the charge estimation using Kalman filtering. *J. Power Sources*, vol. *239*, pp. 294–307.
- Pavkovic, D., Smetko, V., Hrgetic, M., & Komljenovic, A. (2014). Dual Kalman filter-based on the SoC/SoH estimator for an ultracapacitor module. *2014 IEEE Conf. Control Appl. CCA 2014*, (pp. 1783–1788).
- Pozo, B., Garate, J., Ferreira, S., Fernandez, I., & Fernandez de Gorostiza, E. (2018). Supercapacitor Electro-Mathematical and Machine Learning Modelling for Low Power Applications. *Electronics*, *7*(4), 44.
- Richardson, R. R., & Howey, D. A. (2015). Sensorless Battery Internal Temperature Estimation Using a Kalman Filter With Impedance Measurement. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, *6*(4), 1190–1199.
- Saha, P., Dey, S., & Khanra, M. (2020). Modeling and state of charge estimation of supercapacitor considering leakage effect. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, *67*(1), 350–357.
- Sepasi, S., Ghorbani, R., & Liaw, B. Y. (2014). Improved extended Kalman filter for state of charge estimation of battery pack. *Journal of Power Sources*, *255*, 368–376.
- Tian, J., Xiong, R., Shen, W., & Wang, J. (2019). Frequency and time domain modelling and online state of charge monitoring for ultracapacitors. *Energy*, vol. *176*, pp. 874–887.
- Yan, W., Zhang, B., Zhao, G., Tang, S., Niu, G., & Wang, X. (2018). Battery Management

System with Lebesgue Sampling-Based Extended Kalman Filter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1–1.

Zhang, L., Hu, X., Wang, Z., Sun, F., & Dorrell, D. G. (2018). A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control or management perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *81*, 1868–1878.

Zhang, L., Wang, Z., Sun, F., & Dorrell, D. (2014). Online Parameter Identification of Ultracapacitor Models Using the Extended Kalman Filter. *Energies*, *7(5)*, 3204–3217.

Zhou, Y., Huang, Z., Peng, J., Li, H., & Liao, H. (2017). A generalized extended state observer for supercapacitors state of charge estimation under disturbance. *Proc. Am. Control Conf.*, (pp. 4029–4034).