

PENGARUH KOMPONEN PARASITIK ESR TERHADAP AMPLITUDO ARUS *CHARGING* DAN DISIPASI *THERMAL* KAPASITOR ELEKTROLIT

Winarno¹⁾, Ari Santoso²⁾

¹⁾ Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surabaya
Jl. Sutorejo No 59, Surabaya 60113, Jawa Timur, Indonesia

²⁾ Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
Keputih, Sukolilo, Surabaya 60111, Jawa Timur, Indonesia

E-mail : ¹⁾winarno@ft.um-surabaya.ac.id, ²⁾santoso@ee.its.ac.id

ABSTRAK

Paper ini menyajikan pengaruh komponen parasitik ESR (*equivalent series resistance*) terhadap amplitudo arus *charging* dan disipasi *thermal* kapasitor elektrolit di circuit filter RC frekuensi rendah orde pertama pada frekuensi *cut off*. Evaluasi pengaruh komponen parasitik ESR di kapasitor elektrolit sangat penting karena mempengaruhi umur pemakaian komponen dan degradasi struktur di dalamnya. Di penelitian ini arus *charging* ke kapasitor elektrolit dihasilkan dengan cara menginputkan tegangan *step* ke circuit dan analisis statis dilakukan dalam rentang lima konstanta-waktu τ . Disipasi *thermal* dihitung berdasar besar arus RMS (*root mean square*) dan nilai ESR. Simulasi menunjukkan kapasitor elektrolit dengan komponen parasitik ESR menghasilkan arus *charging* dengan amplitudo lebih tinggi dibanding kapasitor tanpa komponen parasitik ESR. Berdasar simulasi diperoleh selisih amplitudo rata – rata sebesar 0,000076 dan disipasi *thermal* sebesar 2.2687 μWatt . Kedua nilai akan bervariasi mengikuti frekuensi kerja filter dan dalam jangka panjang mengakibatkan degradasi struktur kapasitor elektrolit.

Kata kunci: ESR, LPF, frekwensi cut off, konstanta waktu τ

ABSTRACT

This paper presents the effect of parasitic components ESR on the amplitude of charging current and thermal dissipation in first order low pass passive RC filter at cut off frequency. Evaluation of parasitic components ESR is crucial because of affecting lifetime and structural degradation in electrolytic capacitor. In this paper charging current is made by inputting step voltage to circuit and static analysis performed in the range of five time constants τ . Thermal dissipation calculated based on RMS current and ESR value. Simulation shows electrolytic capacitor with parasitic components ESR contributes to a higher charging current amplitude. Based on simulation the differential amplitude average of 0.000076 and thermal dissipation of 2.2687 μWatt . Both value varies response to operating frequency of filter and structural degradation for long time operation.

Keywords: ESR, LPF, cut off frequency, time constant τ .

1. PENDAHULUAN

Komponen parasitik ESR ada di dalam struktur kapasitor elektrolit aluminum dan

kapasitor elektrolit tantalum. Komponen ESR ini terjadi ketika kapasitor elektrolit dalam proses pembuatan di industri. Faktor – faktor yang mempengaruhi nilai komponen parasitik di dalam

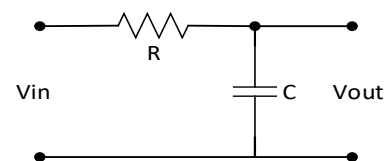
struktur kapasitor elektrolit mencakup; material yang digunakan, nilai *ohmic*, panjang foil, ketebalan layer oksida aluminium [1].

Salah satu implementasi kapasitor elektrolit ada di filter RC frekuensi rendah orde pertama [2]. Ini adalah tipe filter paling sederhana yang disusun dari satu resistor dan satu kapasitor elektrolit. Filter ini difungsikan untuk menguatkan sinyal dibawah frekuensi *cut off* dan melemahkan sinyal diatas frekuensi *cut off* [3]. Daerah dimana sinyal terletak dibawah frekuensi *cut off* disebut *pass band* dan daerah dimana sinyal terletak diatas frekuensi *cut off* disebut *stop band*. Pelemahan sinyal mulai terjadi pada frekuensi *cut off* dan terus terjadi selama frekuensi kerja filter melebihi frekuensi *cut off*. Di penelitian ini *switch* S ditambahkan ke circuit untuk mendeskripsikan tegangan *step*, gambar 1 (c). Tegangan input V_{in} dihubungkan pada salah satu terminal resistor pada sisi kiri circuit sementara tegangan output V_{out} disadap pada salah satu terminal kapasitor elektrolit pada sisi kanan circuit. Jika tegangan *step* dipilih sebagai tegangan input V_{in} maka proses *charging* kapasitor elektrolit terjadi ketika *switch* S ditutup. Arus *charging* masuk ke kapasitor elektrolit secara eksponensial dari nilai tertinggi ke nilai terendah [4]. Bentuk gelombang arus *charging* berlawanan dengan tegangan *charging*. Amplitudo arus *charging* mengalami penurunan dari besar ke rendah sementara amplitudo tegangan *charging* mengalami kenaikan dari rendah ke besar. Proses *discharging* oleh kapasitor elektrolit terjadi ketika *switch* S dibuka dan ada pembebanan pada sisi output circuit yang memungkinkan arus keluar dari kapasitor elektrolit menuju ke beban. Jika *switch* S dibuka dan ditutup secara kontinyu, secara mekanik maupun elektronik, maka proses *charging* dan *discharging* juga terjadi secara kontinyu [5]. Di mekanisme ini frekuensi hadir yang nilainya ditentukan oleh kecepatan buka-tutup *switch* S. Model dari kapasitor elektrolit dengan komponen parasitik ESR telah diinvestigasi dengan teliti di [6]. Model menunjukkan komponen parasitik ESR dihubung secara seri dengan kapasitansi kapasitor elektrolit. Di circuit filter RC frekuensi rendah orde pertama, komponen parasitik ESR

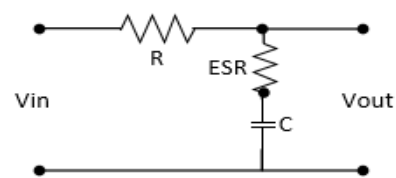
membentuk rangkaian seri dengan resistor R sehingga resistansi total adalah penjumlahan kedua komponen ini. Ketika frekuensi kerja di filter RC frekuensi rendah orde pertama melebihi frekuensi *cut off* maka ada pengaruh signifikan di sinyal output. Efek ini telah diinvestigasi dengan teliti di [7].

2. METODE PENELITIAN

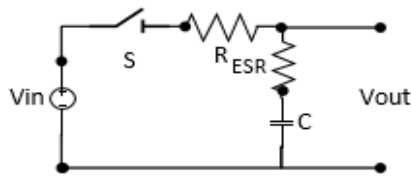
Gambar 1 (a) menunjukkan filter RC frekuensi rendah orde pertama tanpa komponen parasitik ESR. Rangkaian disusun dari sebuah resistor R satuan ohm dan sebuah kapasitor C satuan farad tanpa komponen parasitik ESR. Tegangan input V_{in} disambung dengan salah satu terminal resistor R sementara tegangan output V_{out} disadap pada salah satu terminal kapasitor C . Gambar 1 (b) menunjukkan filter RC frekuensi rendah orde pertama dengan komponen parasitik ESR. Komponen parasitik ESR disambung secara seri dengan kapasitansi kapasitor C sehingga membentuk dua resistor didalam circuit yang mana adalah beban bagi tegangan input V_{in} . Gambar 1 (c) menunjukkan penambahan *switch* S didalam circuit yang disambung secara seri dengan salah satu terminal resistor R untuk mendeskripsikan proses *charging*. Ketika *switch* S ditutup arus *charging* mengalir lewat resistor R menuju ke kapasitor elektrolit C . Diasumsikan tegangan awal pada kapasitor elektrolit C adalah 0 volt.



(a)



(b)



(c)

Gambar 1 (a) kapasitor tanpa ESR (b) kapasitor dengan ESR (c) circuit untuk mendeskripsikan proses *charging*

Konversi ke dalam bentuk Laplace untuk kedua komponen pasip resistor R dan kapasitor elektrolit C kita dapatkan

resistor R menjadi

$$R = R \dots \dots \dots (1)$$

kapasitor elektrolit C menjadi

$$C = \frac{1}{sC} \dots \dots \dots (2)$$

Mengacu ke gambar 1 (a) dan menggunakan hukum II Kirchhoff, kita dapatkan

$$V_{in(s)} = V_{R(s)} + V_{C(s)} \dots \dots \dots (3)$$

dimana

$V_{in(s)}$ adalah tegangan sisi input satuan volt

$V_{R(s)}$ adalah tegangan pada resistor satuan volt

$V_{C(s)}$ adalah tegangan pada kapasitor satuan volt

Substitusi persamaan (1) dan persamaan (2) ke persamaan (3), kita dapatkan

$$V_{in(s)} = I_{(s)}R + I_{(s)}\frac{1}{sC} \dots \dots \dots (4)$$

atau

$$V_{in(s)} = I_{(s)}\left(R + \frac{1}{sC}\right)$$

dan tegangan output $V_{out(s)}$ adalah tegangan pada kapasitor elektrolit $V_{C(s)}$, kita dapatkan

$$V_{out(s)} = I_{(s)}\frac{1}{sC} \dots \dots \dots (5)$$

atau

$$I_{(s)} = sCV_{out(s)}$$

Substitusi persamaan (5) ke persamaan (4), kita dapatkan

$$V_{in(s)} = sCV_{out(s)}R + V_{out(s)}$$

dan perbandingan tegangan output $V_{out(s)}$ ke tegangan input $V_{in(s)}$ kita dapatkan

$$V_{in(s)} = V_{out(s)}(sCR + 1)$$

$$\frac{V_{out(s)}}{V_{in(s)}} = \frac{1}{sCR + 1} \dots \dots \dots (6)$$

Persamaan (6) adalah fungsi transfer dari tegangan output $V_{out(s)}$ ke tegangan input $V_{in(s)}$ untuk filter RC frekuensi rendah orde pertama tanpa komponen parasitik ESR.

Dengan mengkonversi ke domain waktu kita dapatkan

$$V_{out(t)} = V_{in(t)}\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \dots \dots \dots (7)$$

$$\tau = RC$$

dimana

τ adalah konstanta – waktu satuan detik

Dengan cara yang sama kita dapatkan fungsi transfer dari tegangan output $V_{out(s)}$ ke tegangan input $V_{in(s)}$ untuk filter RC frekuensi rendah orde pertama dengan komponen parasitik ESR

$$\frac{V_{out(s)}}{V_{in(s)}} = \frac{1}{sC\alpha + 1} \dots \dots \dots (8)$$

$$\text{dimana } \alpha = \frac{R\left(1 - \frac{r_c^2}{R^2}\right)}{1 - \frac{r_c}{R}}$$

Mengacu ke persamaan (8) kita dapatkan persamaan tegangan output $V_{out(s)}$ adalah

$$V_{out(s)} = V_{in(s)}\left(\frac{1}{sC\alpha + 1}\right)$$

Dengan mengkonversi ke domain waktu kita dapatkan

$$V_{out(t)} = V_{in(t)} \left(1 - e^{-\frac{t}{\alpha C}}\right) \dots \dots \dots (9)$$

Besar arus yang masuk ke kapasitor elektrolit C dapat menggunakan rumus dasar sebagai berikut

$$i_C = C \frac{dV_C(t)}{dt}$$

Dengan mendefereensialkan (9) kita dapatkan

$$i_{C(t)} = \frac{V_{in(t)}}{\alpha} e^{-\frac{t}{\alpha C}} \dots \dots \dots (10)$$

Persamaan (10) adalah persamaan arus *charging* yang masuk ke dalam kapasitor elektrolit C. Disipasi *thermal* diperoleh dengan cara mengalikan besar arus I_{RMS} dan nilai ESR. Nilai arus I_{RMS} dapat dihitung berdasar persamaan dibawah ini

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{i_1^2 + i_2^2 + \dots + i_n^2}{n}} \dots \dots \dots (11)$$

dimana

i_n adalah sampel arus satuan amper

n adalah banyaknya sampel

Kita dapat menghitung disipasi *thermal* pada ESR $P_{rata-rata}$ berdasar persamaan

$$P_{rata-rata} = I_{RMS}^2 ESR \dots \dots \dots (12)$$

dimana

$P_{rata-rata}$ adalah disipasi *thermal* satuan watt

I_{RMS} adalah arus *effective* satuan amper

ESR adalah nilai komponen parasitik satuan ohm

Parameter – parameter yang digunakan di filter RC frekuensi rendah orde pertama ditunjukkan oleh tabel 1.

Tabel 1 parameter yang digunakan

Parameter	Nilai	Satuan
Resistor	3.9	Ω
Kapasitor elektrolit	470	μF

ESR	0.019	Ω
Frekuensi	100	Hz

3. HASIL DAN DISKUSI

Mengacu ke persamaan (6) dan persamaan (8) kita dapatkan fungsi transfer dari arus *charging* ke tegangan input untuk kapasitor elektrolit dengan komponen parasitik ESR dan kapasitor elektrolit tanpa komponen parasitik ESR. Menggunakan parameter - parameter di tabel 1 kita dapatkan hasil fungsi transfer sebagai berikut

$$G(s) = \frac{I_{C(s)}}{V_{in(s)}} = \frac{0.2552}{s + 542.9088}$$

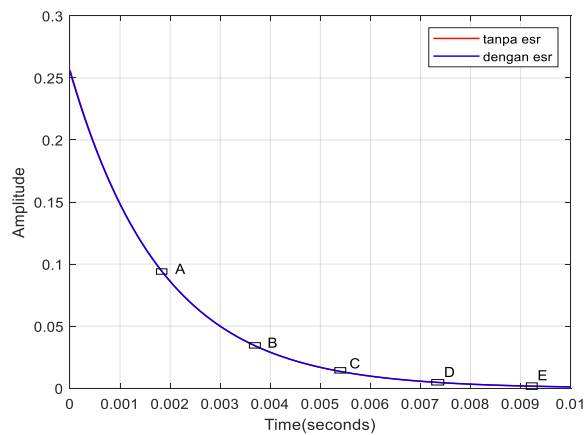
Fungsi transfer diatas adalah fungsi transfer dari arus *charging* ke tegangan input untuk kapasitor elektrolit dengan komponen parasitik ESR. Amplitudo arus *charging* awal pada kapasitor elektrolit dengan komponen parasitik ESR adalah bagian pembilang dari fungsi transfer yaitu sebesar 0.2552

$$G(s) = \frac{I_{C(s)}}{V_{in(s)}} = \frac{0.2564}{s + 545.5537}$$

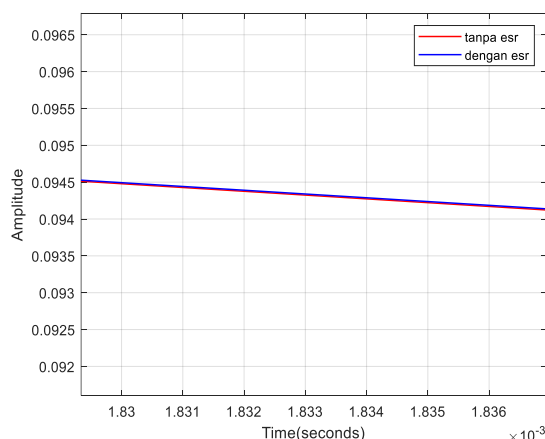
Fungsi transfer diatas adalah fungsi transfer dari arus *charging* ke tegangan input untuk kapasitor elektrolit tanpa komponen parasitik ESR. Amplitudo arus *charging* awal pada kapasitor elektrolit tanpa komponen parasitik ESR adalah bagian pembilang dari fungsi transfer yaitu sebesar 0.2564

Simulasi direalisasi menggunakan bahasa pemrograman Matlab. Analisis statis dilakukan dalam rentang konstanta-waktu τ pertama hingga konstanta-waktu τ kelima. Gambar 2 (a) menunjukkan arus *charging* turun secara eksponensial dimulai dengan nilai awal 0.2564 untuk kapasitor elektrolit C tanpa komponen parasitik ESR dan dengan nilai awal 0.2552 untuk kapasitor elektrolit C dengan komponen parasitik ESR. Di grafik ini juga ditunjukkan lokasi lima titik yang dipilih berdasar konstanta-waktu τ masing – masing titik A, B, C, D, E.

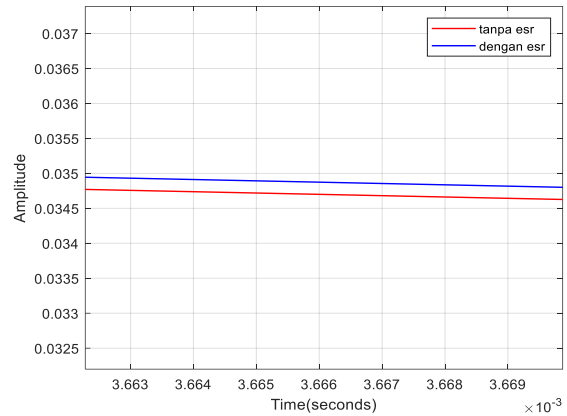
Gambar 2 (b) menunjukkan selisih amplitudo arus *charging* sebesar 0.00001 pada konstanta-waktu τ pertama. Gambar 2 (c) menunjukkan selisih amplitudo arus *charging* sebesar 0.00018 pada konstanta-waktu τ kedua. Gambar 2 (d) menunjukkan selisih amplitudo arus *charging* sebesar 0.00005 pada konstanta-waktu τ ketiga. Gambar 2 (e) menunjukkan selisih amplitudo arus *charging* sebesar 0.00010 pada konstanta-waktu τ keempat. Gambar 2 (f) menunjukkan selisih amplitudo arus *charging* sebesar 0.00004 pada konstanta-waktu τ kelima. Tabel 2 menunjukkan selisih amplitudo arus *charging* mulai dari konstanta-waktu τ pertama hingga konstanta-waktu τ kelima.



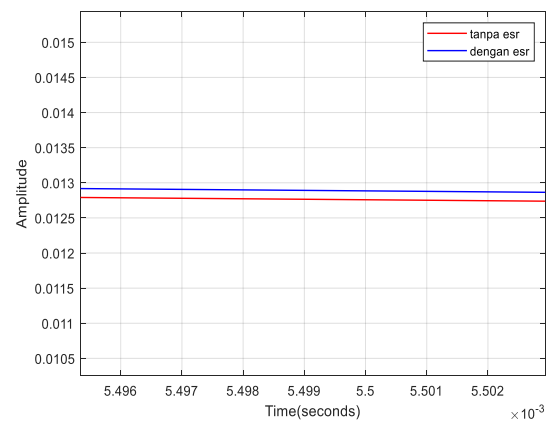
(a)



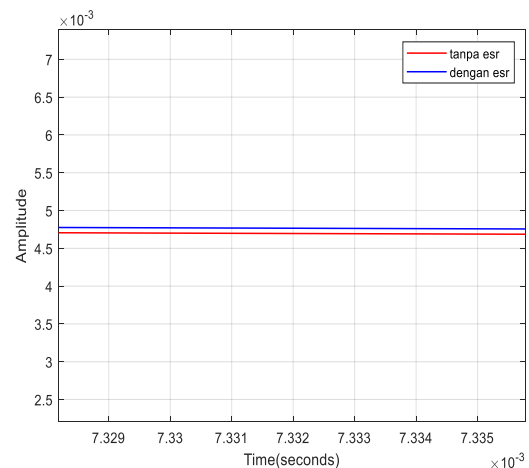
(b)



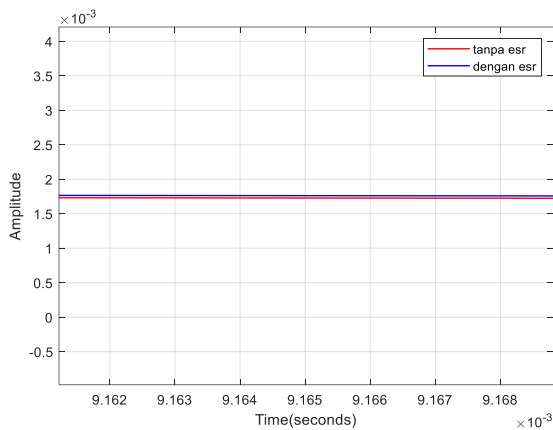
(c)



(d)



(e)



(f)

Gambar 2 (a) lokasi lima titik yang dipilih pada grafik arus *charging*

(b) hingga (f) perubahan amplitudo berdasar konstanta-waktu τ

Gambar 2 (a) menunjukkan lokasi lima titik yang dipilih masing – masing titik A, B, C, D, E. Gambar 2 (b) hingga (f) diatas menunjukkan kapasitor elektrolit C dengan komponen parasitik ESR, ditunjukkan oleh garis berwarna biru didalam grafik, menghasilkan amplitudo arus *charging* yang lebih besar dibanding kapasitor elektrolit C tanpa komponen parasitik ESR, ditunjukkan oleh garis warna merah didalam grafik. Selisih amplitudo rata – rata sebesar 0.000076

Tabel 2 menunjukkan perubahan amplitudo arus *charging* mulai dari konstanta-waktu τ pertama hingga konstanta-waktu τ ke lima.

Tabel 2 perubahan amplitudo arus *charging* tanpa dan dengan komponen parasitik ESR

Konstanta waktu τ	Titik	Amplitudo dengan ESR	Amplitudo tanpa ESR	Selisih amplitudo
τ	A	0.09449	0.09448	0.00001
2τ	B	0.03499	0.03481	0.00018
3τ	C	0.01295	0.01290	0.00005
4τ	D	0.00475	0.00465	0.00010
5τ	E	0.00177	0.00173	0.00004

Mengacu ke persamaan (11) dan persamaan (12) serta hasil di tabel 2 kita dapatkan

Untuk kapasitor elektrolit C dengan komponen parasitik ESR kita dapatkan

$$I_{RMS} = 0.12286 \text{ amper}$$

$P_{rata-rata} = 0.12286^2 \cdot 0.019 = 0.2868 \text{ mWatt}$
 Untuk kapasitor elektrolit C tanpa komponen parasitik ESR kita dapatkan

$$I_{RMS} = 0.12335 \text{ amper}$$

$P_{rata-rata} = 0.12335^2 \cdot 0.019 = 0.2891 \text{ mWatt}$
 Disipasi *thermal* yang terjadi akibat adanya komponen parasitik ESR kita dapatkan

$$\Delta P_{rata-rata} = 0.2891 - 0.2868 = 2.2687 \mu\text{Watt}$$

KESIMPULAN DAN SARAN

Komponen parasitik ESR didalam struktur kapasitor elektrolit mempunyai pengaruh terhadap amplitudo arus *charging* di rangkaian filter RC frekuensi rendah orde pertama. Pada frekuensi *cut off* komponen ini mampu menaikkan amplitudo arus *charging* dengan selisih amplitudo rata – rata sebesar 0.000076. Disipasi *thermal* yang dihasilkan sebesar $2.2687 \mu\text{Watt}$. Komponen parasitik ESR harus menjadi pertimbangan dalam mendesign rangkaian filter karena akan mempengaruhi umur pemakaian komponen dan degradasi struktur didalamnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. J. Shortt, “THE EFFECT OF CAPACITOR EQUIVALENT SERIES INDUCTANCE ON DC - DC CONVERTER PERFORMANCE AND STABILITY,” pp. 136–142, 1989.
- [2] H. S. H. Chung, W. T. Yan, and A. K. T. Sung, “Active cancellation of capacitor ESR and ESL effects for improving converter transient and steady-state response,” *2009 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2009*, pp. 723–730, 2009, doi: 10.1109/ECCE.2009.5316443.
- [3] L. Syed, S. H. Hasan, H. Rashid, and W. Gulistan, “Designing band pass filter for HF radio’s front end,” *2019 Int. Conf. Commun. Technol. ComTech 2019*, no. ComTech, pp. 60–64, 2019, doi: 10.1109/COMTECH.2019.8737794.
- [4] A. K. Jonscher, “Energy losses in charging

- and discharging of capacitors,” *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-22, no. 4, pp. 361–364, 1987, doi: 10.1109/TEI.1987.298894.
- [5] S. Y. Ou, H. F. Su, and C. Y. Tang, “Analysis of output capacitor parasitic effects to output voltage ripple on power converter,” *Proc. Int. Conf. Power Electron. Drive Syst.*, no. December, pp. 367–372, 2011, doi: 10.1109/PEDS.2011.6147274.
- [6] S. B. Narale, A. Verma, and S. Anand, “Structure and Degradation of Aluminum Electrolytic Capacitors,” *2019 Natl. Power Electron. Conf. NPEC 2019*, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/NPEC47332.2019.9034726.
- [7] W. C. Chen *et al.*, “Reduction of equivalent series inductor effect in delay-ripple reshaped constant on-time control for buck converter with multi-layer ceramic capacitors,” *2012 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2012*, vol. 28, no. 5, pp. 755–758, 2012, doi: 10.1109/ECCE.2012.6342744.