

Kontrol Ripple Suppression Pada Low-Inductance Buck Converter Untuk Continuous Conduction Operation

Fifi Hesty Sholihah^a

^aPoliteknik Elektronika Negeri Surabaya

*correspondence email : fifi@pens.ac.id

Abstract— This work proposes a control strategy that keeps a buck converter in Continuous Conduction Mode (CCM) even with a low inductance. The architecture is a cascaded scheme with an outer voltage loop and an inner current loop featuring a valley clamp to prevent inductor-current collapse, complemented by feedforward and anti-windup under duty saturation. The approach is validated in simulation across inductances L=L=L= 40 mH, 10 mH, 5 mH, and 1 mH, and under both resistive and inductive (R-L) loads. Results show consistent suppression of current and voltage ripple. At L=1 mH, inductor-current ripple decreases from 12.44 Ap-p to 1.918 Ap-p ($\approx 6.5\times$), while output-voltage ripple drops from 8.536 V to 0.63 V ($\approx 13.6\times$), with the output regulated at 60 V. At L=10 mH, current ripple is reduced from 1.748 A to 0.337 A ($\approx 5.2\times$) and voltage ripple from 4.855 V to 0.11 V ($\approx 44\times$). The controller also damps R-L load effects so the inductor current never hits zero. These findings indicate that low-inductance operation is feasible while preserving power quality, stability, and enabling higher power density.

Index Terms— buck converter; continuous conduction mode; ripple suppression.

Abstrak— Penelitian ini mengusulkan strategi kendali untuk buck converter agar tetap beroperasi pada Continuous Conduction Mode (CCM) meskipun menggunakan induktor bernilai kecil. Arsitektur yang diusulkan berupa kendali kaskade: loop tegangan luar dan loop arus dalam dengan valley clamp sebagai penjaga lembah arus, ditambah feedforward dan anti-windup pada pembatasan duty. Validasi dilakukan melalui simulasi pada variasi induktansi L=L=L= 40 mH, 10 mH, 5 mH, dan 1 mH, serta beban resistif dan induktif (R-L). Hasil menunjukkan penekanan riak arus dan tegangan yang konsisten di seluruh skenario. Pada L=1 mH, riak arus berkurang dari 12,44 Ap-p menjadi 1,918 Ap-p ($\approx 6,5\times$), sementara riak tegangan turun dari 8,536 V menjadi 0,63 V ($\approx 13,6\times$), dengan tegangan keluaran tetap 60 V. Pada L=10 mH, riak arus turun dari 1,748 A menjadi 0,337 A ($\approx 5,2\times$) dan riak tegangan dari 4,855 V menjadi 0,11 V ($\approx 44\times$). Pengendali juga meredam efek beban R-L sehingga arus induktor tidak menyentuh nol. Temuan ini menunjukkan bahwa operasi low-inductance tetap memungkinkan sambil menjaga kualitas daya, stabilitas, dan potensi peningkatan kerapatan daya.

Kata Kunci— buck converter; continuous conduction mode; penekanan riak arus.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi konverter daya telah memberikan kontribusi yang signifikan di berbagai bidang, mulai dari sistem tenaga listrik, transportasi listrik, hingga perangkat elektronik portabel. Konverter daya menjadi komponen esensial karena kemampuannya dalam melakukan konversi energi listrik sesuai dengan kebutuhan beban maupun sistem, baik dalam bentuk pengaturan tegangan, arus, maupun kualitas daya [1]. Peran ini semakin penting seiring meningkatnya kebutuhan konversi daya yang efisien dan adaptif pada sistem modern.

Konverter daya pada dasarnya diperkenalkan untuk menghasilkan proses konversi dengan efisiensi yang tinggi. Efisiensi ini sangat krusial, terutama pada aplikasi modern yang menuntut kerapatan daya (high power density), ukuran sistem yang ringkas, serta keandalan yang terjamin [2]. Di antara berbagai jenis konverter daya, DC-DC converter berperan penting dalam mengubah level tegangan DC secara efisien dengan memanfaatkan saklar semikonduktor berfrekuensi tinggi [3]. Namun, efisiensi yang tinggi tidak cukup, karena stabilitas operasional juga menjadi faktor yang menentukan kualitas kinerja converter [4].

Salah satu aspek operasional penting dari DC-DC converter adalah kondisi Continuous Conduction Mode (CCM). Pada kondisi ini, arus induktor tidak pernah turun hingga nol selama satu periode pensaklaran [5]. Operasi dalam CCM sangat diinginkan karena mampu menghasilkan riak arus (current ripple) yang lebih kecil, menjaga kestabilan tegangan output, serta mengurangi stres pada komponen semikonduktor [6]. Sebaliknya, jika konverter beroperasi dalam Discontinuous Conduction Mode (DCM), kinerja sistem cenderung menurun akibat meningkatnya riak arus, rugi-rugi pensaklaran, serta respon

transien yang kurang baik. Oleh karena itu, menjaga agar konverter beroperasi pada kondisi CCM menjadi hal yang sangat penting. Upaya untuk menjaga kondisi ini erat kaitannya dengan desain komponen pasif yang digunakan dalam konverter.

Perancangan komponen pasif, khususnya induktor pada DC-DC converter, umumnya dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi operasi tertentu, seperti beban nominal, tegangan sumber, atau rentang duty cycle tertentu. Namun, jika terjadi variasi pada parameter-parameter tersebut, performa konverter dapat berubah secara signifikan [7]. Dalam banyak kasus, untuk memastikan arus tetap berada pada CCM, nilai induktansi dibuat relatif besar. Pendekatan ini memang efektif menekan riau arus, tetapi menimbulkan konsekuensi berupa ukuran dan bobot induktor yang besar, biaya yang lebih tinggi, serta respon dinamis yang lebih lambat [8]. Hal ini mendorong perlunya pendekatan alternatif yang mampu menjaga CCM tanpa harus mengorbankan efisiensi dan kepraktisan desain.

Berdasarkan keterbatasan tersebut, penelitian ini mengusulkan desain buck converter yang mampu beroperasi pada CCM meskipun menggunakan nilai induktansi yang rendah dan menghadapi variasi beban. Konsep ini diwujudkan melalui perancangan sistem kontrol berlapis yang memadukan regulasi tegangan dan pembatasan riau arus, sehingga arus induktor tetap kontinu tanpa harus memperbesar nilai induktansi. Secara umum, metode ini melibatkan pengukuran tegangan keluaran dan arus induktor, kemudian menghasilkan sinyal kendali yang mampu menstabilkan tegangan sekaligus menjaga arus pada rentang CCM. Dengan pendekatan ini, buck converter yang lebih kompak, efisien, dan adaptif terhadap variasi beban dapat direalisasikan, sekaligus mengatasi keterbatasan desain konvensional yang sangat bergantung pada nilai induktor yang besar.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Buck converter

Buck converter menurunkan tegangan DC dengan saklar ber-PWM, dioda/*rectifier* sinkron, induktor L, dan kapasitor keluaran C. Pada CCM ideal, hubungan *steady-state* adalah [9]

$$V_o = DV_{in} \quad (1)$$

dengan D *duty cycle*. Persamaan ini berasal dari keseimbangan volt-detik pada induktor antara interval ON ($V_{in} - V_o$) dan OFF ($-V_o$). *Buck converter* dikenal sebagai salah satu *DC-DC converter* yang memiliki efisiensi tinggi, bahkan dapat mencapai lebih dari 90% pada aplikasi praktis. Efisiensi inilah yang menjadikannya banyak digunakan pada perangkat elektronik portabel, sistem tenaga surya, maupun kendaraan listrik.

2.2. Continuous Conduction Mode (CCM)

Continuous Conduction Mode (CCM) adalah kondisi ketika arus induktor tidak pernah turun ke nol selama satu periode pensaklaran. Pada kondisi ini, arus induktor berosilasi di sekitar nilai rata-rata tetapi selalu positif. Sebaliknya, jika arus induktor mencapai nol sebelum periode pensaklaran berakhir, konverter masuk ke *Discontinuous Conduction Mode* (DCM).

Arus beban kritis pada batas CCM-DCM dirumuskan sebagai [10]:

$$I_{o,critical} = \frac{\Delta I_L}{2} \quad (2)$$

dengan riau arus induktor ΔI_L :

$$\Delta I_L = \frac{(V_{in} - V_o)D}{L f_s} \quad (3)$$

Dari persamaan tersebut, induktansi minimum yang dibutuhkan agar konverter tetap beroperasi dalam CCM pada arus beban I_o adalah:

$$L_{min} = \frac{(V_{in} - V_o)D}{2 f_s I_o} = \frac{(1 - D)R}{2 f_s}, \quad (4)$$

$$R = \frac{V_o}{I_o}$$

Jika konverter masuk ke DCM, arus induktor akan nol pada sebagian periode, menyebabkan riau lebih besar, efisiensi menurun, serta hubungan input-output menjadi non-linear sehingga desain kontrol lebih kompleks [11].

2.3. Riak Arus dan Tegangan

Riak (*ripple*) adalah komponen gelombang AC kecil yang menumpang pada sinyal DC ideal. Pada *buck converter* dalam CCM, riak arus induktor berbentuk segitiga dengan amplitudo seperti pada persamaan 3.

Riak ini menimbulkan riak tegangan keluaran yang dipengaruhi oleh kapasitansi dan *Equivalent Series Resistance* (ESR):

$$\Delta V_{o,C} \approx \frac{\Delta I_L}{8f_s C}, \quad \Delta V_{o,ESR} \approx \Delta I_L \cdot ESR \quad (5)$$

Riak harus diminimalisir karena menurunkan kualitas daya, menimbulkan *Electromagnetic Interference* (EMI), memperpendek umur kapasitor, dan dapat merusak beban sensitive [12].

2.4. Penelitian Sebelumnya

Beberapa penelitian telah menelaah *buck converter* dari sisi pemodelan, riak, dan metode kontrol. Publikasi [13] menganalisis riak arus dan tegangan *buck converter* pada beban LED non-linear, menunjukkan bahwa karakteristik riaknya berbeda dengan beban resistif sehingga penting dalam perancangan komponen pasif. Namun, penelitian ini tidak membahas strategi kontrol untuk menjaga CCM dengan induktansi rendah.

Publikasi [14] memodelkan *buck* dan *synchronous buck non-ideal* dengan mempertimbangkan ESR, lalu memvalidasi respon frekuensinya. Kontribusinya terletak pada pemahaman karakteristik non-ideal, tetapi tidak menawarkan teknik kontrol untuk mengatasi variasi beban dengan induktansi kecil.

Publikasi [15] mengeksplorasi *buck converter* dengan *average current mode control* (ACMC), menunjukkan perbaikan stabilitas dan pengurangan riak arus melalui desain kompensator, tetapi tidak menargetkan operasi CCM dengan induktansi rendah.

Publikasi [16] mengusulkan *adaptive on-time valley-current-mode control* yang meningkatkan respon transien dan efisiensi beban ringan, tetapi fokus pada aplikasi IC portabel, bukan kontrol CCM pada induktansi kecil.

Publikasi [17] membandingkan *buck sinkron* dan *asinkron* dengan menyoroti pengaruh kontrol arus pada efisiensi dan riak, namun tidak secara spesifik membahas strategi untuk mempertahankan CCM dengan L yang diperkecil.

Publikasi [18] merancang *buck converter* dengan kontrol PID berbasis Arduino untuk menjaga tegangan output, namun tidak menyuggerkan kontrol arus induktor ataupun CCM.

2.5. Kontribusi Penelitian

Dari berbagai publikasi internasional maupun nasional, terlihat bahwa sebagian besar studi berfokus pada pemodelan, analisis riak, serta pengembangan kontrol konvensional untuk stabilitas tegangan atau efisiensi. Akan tetapi, belum banyak penelitian yang secara spesifik membahas strategi kontrol untuk menjaga operasi CCM pada *buck converter* dengan induktansi rendah dan dalam kondisi beban yang bervariasi. Cela penelitian inilah yang menjadi kontribusi utama dari penelitian ini, yaitu mengusulkan desain *buck converter* dengan kontrol berbasis pengendalian riak arus sehingga mampu tetap beroperasi dalam CCM meskipun nilai induktansinya kecil.

III. METODE

a) Pemodelan Rata-rata dalam CCM

Buck converter dapat dimodelkan menggunakan pendekatan perataan PWM (*average model*) pada kondisi *Continuous Conduction Mode* (CCM). Dengan state $x = [i_L \ v_o]^T$ dan duty $d \in (0,1)$, persamaan dinamikanya dituliskan sebagai:

$$\begin{aligned} \dot{i}_L &= dV_{in} - v_o, \\ \dot{C}_{vo} &= i_L - \frac{v_o}{R}, \end{aligned} \quad (6)$$

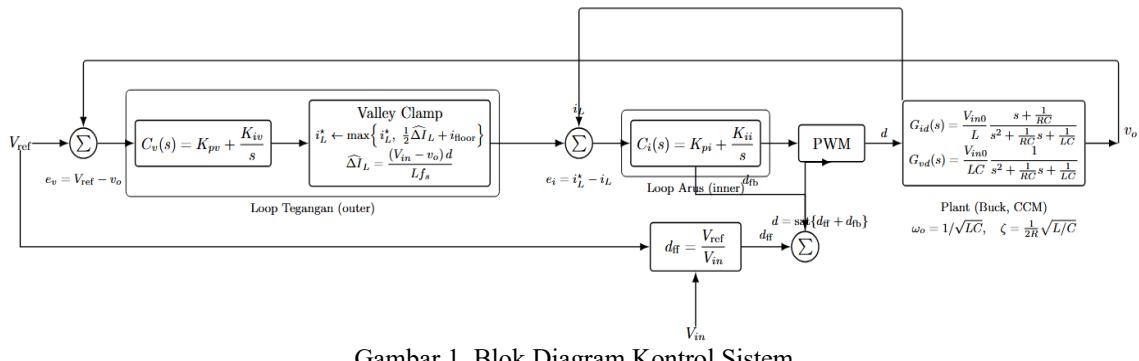
Linearisasi di sekitar titik kerja $(D, V_{in}, I_{L0}, V_{o0})$ menghasilkan fungsi alih kecil-sinyal (huruf kecil menyatakan deviasi):

$$\begin{aligned} G_{vd}(s) &= \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} \\ &= \frac{V_{in0}}{LC} \frac{1}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \\ G_{id}(s) &= \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} \\ &= \frac{V_{in0}}{L} \frac{s + \frac{1}{RC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \end{aligned} \quad (7)$$

Frekuensi alami resonansi dan faktor redaman rangkaian LC didefinisikan sebagai:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad \zeta = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (8)$$

Model ini menjadi dasar untuk perancangan pengendali arus (G_{id}) dan tegangan (G_{vd}) pada tahap selanjutnya.



Gambar 1. Blok Diagram Kontrol Sistem

b) Struktur Kendali Berjenjang

Untuk menjamin kestabilan tegangan keluaran sekaligus menjaga kondisi CCM pada induktansi rendah, digunakan strategi kendali berjenjang (cascade control). Struktur kendali ini terdiri dari:

1. Loop arus (inner loop) yang mengatur agar arus induktor mengikuti referensi i_L^* .
2. Loop tegangan (outer loop) yang menghasilkan referensi arus i_L^* berdasarkan error tegangan keluaran.
3. Generator PWM yang mengonversi sinyal kendali menjadi duty cycle $d(t)$ untuk mengatur saklar MOSFET.

Loop Arus

Error arus didefinisikan sebagai:

$$e_i(t) = i_L^*(t) - i_L(t) \quad (9)$$

Pengendali PI yang digunakan pada loop arus adalah:

$$C_i(s) = K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s} \quad (10)$$

Fungsi alih loop tertutup untuk arus adalah:

$$T_i(s) = \frac{C_i(s)G_{id}(s)}{1 + C_i(s)G_{id}(s)} \quad (11)$$

Frekuensi crossover ω_{ci} dipilih pada kisaran tiga hingga lima kali ω_o , tetapi tetap jauh di bawah $0.1\omega_s$ agar tidak mendekati frekuensi pensaklaran. Nol pengendali PI diletakkan pada sekitar $\omega_{ci}/3 - \omega_{ci}/5$ untuk memperbaiki margin fasa. Parameter K_{pi} ditentukan dari syarat $|C_i(j\omega_{ci})G_{id}(j\omega_{ci})| = 1$, kemudian $K_{ii} = \omega_{zi}K_{pi}$.

- Loop Tegangan

Error tegangan didefinisikan sebagai:

$$e_v(t) = V_{ref}^*(t) - v_o(t) \quad (12)$$

Pengendali PI yang digunakan pada loop tegangan adalah:

$$C_v(s) = K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s} \quad (13)$$

$$i_L^* = C_v(s) + e_v(s)$$

Jika loop arus dianggap jauh lebih cepat sehingga $i_L \approx i_L^*$, maka fungsi alih dari referensi arus ke tegangan keluaran dapat didekati:

$$G_{vi}(s) \approx \frac{R}{1 + RC s} \quad (14)$$

Frekuensi crossover tegangan ω_{cv} dipilih sekitar seperempat hingga seperenam dari ω_{ci} . Nol pengendali PI diletakkan di sekitar $1/(RC)$ untuk mengimbangi pole beban, sedangkan K_{pv} dihitung dari kriteria $|C_v(j\omega_{cv})G_{vi}(j\omega_{cv})| = 1$ dan $K_{iv} = \omega_{zv}K_{pv}$.

- Generator PWM

Sinyal kendali dari loop arus kemudian dikonversi menjadi duty cycle $d(t)$ menggunakan generator PWM berbasis perbandingan dengan sinyal segitiga pembawa:

$$u_{PWM}(t) = \begin{cases} 1, & d(t) > v_{tri}(t) \\ 0, & d(t) \leq v_{tri}(t) \end{cases} \quad (15)$$

dengan $v_{tri}(t)$ adalah sinyal segitiga pada frekuensi switching. Duty cycle dibatasi pada interval $[0,1]$ dengan mekanisme anti-windup untuk menghindari saturasi integrator [19].

- Penjagaan CCM pada Induktansi Rendah

Batas CCM terhadap DCM ditentukan oleh:

$$I_{o,critical} = \frac{\Delta I_L}{2}, \quad \Delta I_L = \frac{(V_{in} - V_o)D}{Lf_s} \quad (16)$$

Agar operasi tetap berada pada CCM, arus minimum beban harus memenuhi:

$$\Delta I_L \leq 2I_{o,min} \quad (17)$$

Dengan induktansi yang rendah, riak arus ΔI_L cenderung meningkat, sehingga diperlukan strategi kontrol tambahan. Dalam penelitian ini digunakan mekanisme penjagaan lembah arus (valley clamp), dengan memodifikasi referensi arus induktor:

$$i_L^* \leftarrow \max \left\{ i_L^*, \frac{1}{2} \widehat{\Delta I_L} + i_{floor} \right\} \quad (18)$$

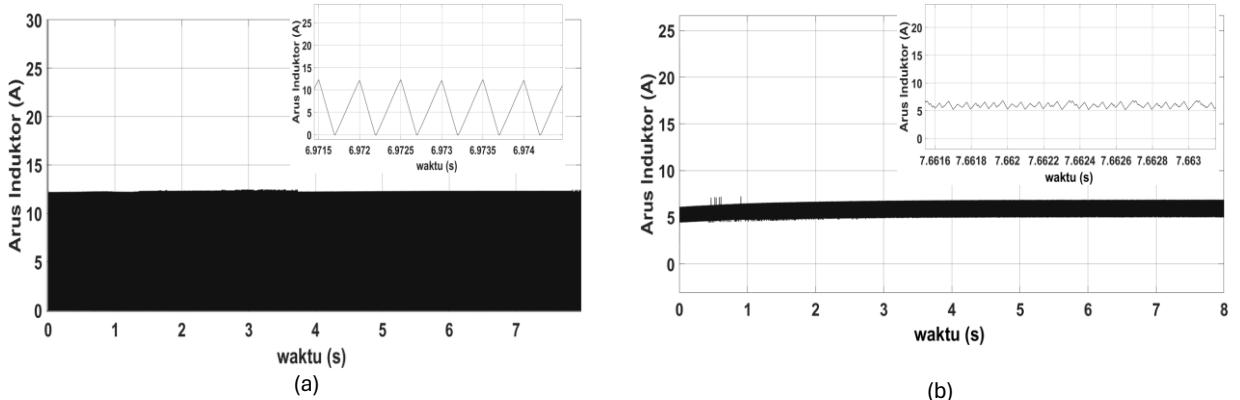
di mana $\widehat{\Delta I_L}$ adalah estimasi riak arus dan i_{floor} adalah batas bawah arus yang ditetapkan agar nilai arus induktor tidak menyentuh nol. Dengan cara ini, meskipun induktansi kecil, operasi CCM tetap terjaga pada berbagai kondisi beban.

Selain itu, ditambahkan feedforward tegangan masukan untuk mempercepat respons terhadap perubahan V_{in} :

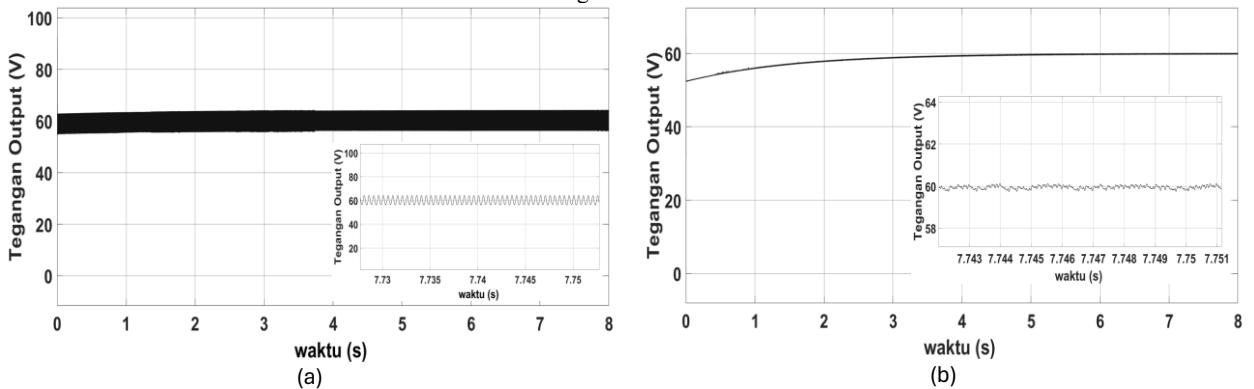
$$d_{ff} = \frac{V_{ref}}{V_{in}}, \quad d = \text{sat}\{d_{ff} + d_{fb}\} \quad (19)$$

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Arus induktor pada sistem buck converter dengan nilai induktansi 1 mH dengan beban resistif yang diuji pada sistem dengan loop tegangan saja dan sistem yang memiliki pengendali CCM. Sistem baseline (hanya loop tegangan) menampilkan riak arus induktor yang sangat besar, . Dari inset terlihat lembah arus mendekati bahkan menyentuh 0 A pada setiap periode, sehingga operasi bergeser ke DCM. Dengan arus DC sekitar 6 A, indeks riak relatif mencapai kira-kira ; artinya komponen riak mendominasi dan menurunkan kualitas regulasi. Konsekuensinya, riak tegangan keluaran menjadi besar, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Arus Induktor Buck Converter dengan Induktansi Rendah , (a) Sistem tanpa Pengendali CCM; (b) Sistem dengan Pengendali CCM



Gambar 3. Tegangan Output Buck Converter dengan Induktansi Rendah, (a) Sistem tanpa Pengendali CCM; (b) Sistem dengan Pengendali CCM

Ketika pengendali CCM yang diusulkan diaktifkan, riak arus turun drastis menjadi $\Delta I_L = 1,918 Ap - p$ dan lemah arus tidak lagi menyentuh nol sehingga CCM terjaga. Penurunan ini setara $\approx 6,5 \times$ lebih kecil dibanding baseline, sehingga riak tegangan keluaran turut berkurang $\approx 6,5 \times$ (karena berbanding lurus dengan ΔI_L). Dari sudut rugi-rugi, komponen ripple RMS pada inductor ($I_{ripple,rms} = \Delta I_L / (2\sqrt{3})$) menyusut terhadap amplitudo riak; rasio $(1,918/12,44)^2 \approx 0.024$ berarti komponen rugi akibat riak $\approx 42 \times$ lebih kecil. Implikasi praktisnya adalah EMI lebih rendah, arus riak kapasitor dan pemanasan $I^2 \cdot \text{ESR}$ turun (umur kapasitor lebih panjang), serta stres arus puncak pada saklar/penyearah menurun.

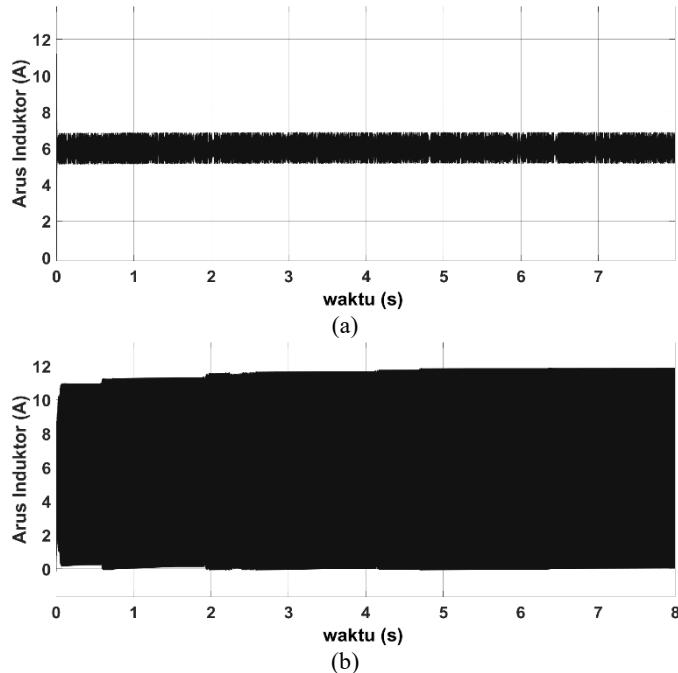
Secara mekanisme, inner current loop menutup dinamika arus sehingga duty disesuaikan cepat terhadap gangguan beban/masukan, sementara valley clamp memaksa $i_{L,min}$ berada di atas ambang (tidak nol) sehingga transisi ke DCM tertahan meski L relatif kecil.

Akibatnya, sistem kembali mengikuti model kecil-sinyal linier khas buck-CCM $\left(s^2 + \frac{1}{RC} s + \frac{1}{LC}\right)^{-1}$, yang memperbaiki regulasi steady-state dan memungkinkan bandwidth kendali dinaikkan tanpa memperbesar noise. Ringkasnya, pada kondisi komponen dan beban yang sama, pengendali CCM terbukti menjaga CCM dan menekan riak arus secara signifikan, sehingga mutu daya dan keandalan konverter meningkat.

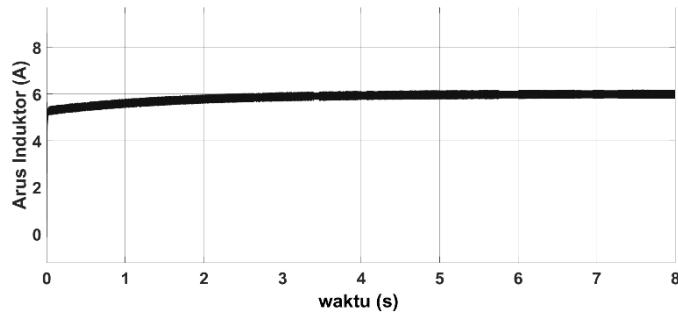
a. Pengujian Variasi Beban

Pengujian kedua dilakukan dengan menggunakan nilai induktansi yang lebih tinggi yaitu 10 mH. Dengan menggunakan nilai induktansi ini, beban sistem divariasikan yaitu beban resistif ($R=10 \Omega$) dan beban induktif ($R=10 \Omega$, $L= 50 \text{ mH}$). Hasil pengujian sistem dengan loop tegangan (tanpa menggunakan pengendali CCM) ditunjukkan pada Gambar 4. Saat sistem memiliki beban resistif, arus inductor mampu beroperasi pada mode CCM dengan nilai riak yang cukup kecil yaitu $1.748 Ap-p$. Namun, ketika sistem dibebani beban induktif, riak arus inductor menjadi sangat besar yaitu $11.86 Ap-p$. Karena beban induktif mengurangi redaman pada filter LC keluaran. Arus beban berubah sangat lambat (konstanta waktunya besar), sehingga komponen riak arus hampir seluruhnya “ditampung” oleh kapasitor dan tegangan keluaran

berosilasi lebih besar. Osilasi tegangan ini membuat tegangan pada induktor berubah-ubah lebih lebar, sehingga riak arus induktor ikut membengkak. Akibatnya, saat beban R-L, ripple arus jauh lebih besar dibanding saat beban resistif murni. Gambar 5 merupakan arus inductor pada sistem pada beban induktif ($R=10 \Omega$, $L= 50 \text{ mH}$) yang dilengkapi dengan pengendali CCM.



Gambar 4. Arus Induktor Buck Converter dengan Induktansi Besar, (a) Beban Resistif; (b) Beban Induktif



Gambar 5. Arus Induktor Buck Converter dengan Induktansi Besar dengan Beban Induktif

Arus induktor pada beban induktif (10Ω , 50 mH) dengan pengendali CCM terlihat stabil di kisaran $\approx 5-6 \text{ A}$ dan tidak pernah menyentuh nol (CCM). Kenaikan perlahan dari sekitar 5 A menuju $\approx 6 \text{ A}$ menggambarkan transien yang halus tanpa overshoot berarti, menandakan redaman yang memadai dari loop arus.

Secara fisik, inner current loop dan mekanisme penjaga lembah (valley clamp) memberikan redaman aktif terhadap interaksi LC keluaran dengan induktansi beban, sehingga osilasi tegangan keluaran ikut menurun dan riak arus induktor terkendali. Hasil ini mengonfirmasi bahwa pengendali yang diusulkan efektif mempertahankan CCM pada beban induktif dan secara bersamaan menekan ripple, yang implikasinya adalah mutu daya lebih baik, stres komponen lebih rendah, dan respons dinamis yang lebih jinak.

Hasil Pengujian dengan memvariasikan nilai induktansi disajikan pada tabel 1 dan 2, dimana tabel 1 adalah hasil pengujian pada sistem tanpa pengendalian CCM sedangkan tabel 2 adalah hasil Pengujian pada sistem dengan pengendalian CCM.

Tabel 1. Hasil Pengujian Pada Sistem Tanpa Pengendali CCM

Parameter	Induktansi Buck Converter			
	40 mH	10 mH	5 mH	1 mH
Tegangan Input	100 V	100 V	100 V	100 V
Arus Input	3.22 A	3.14 A	3.14 A	2.79 A

Tegangan Output	60 V	59.88 V	59.88 V	60 V
Peak-to-peak Tegangan Output	0.26 V	4.85 V	1.41 V	8.53 V
Arus Output	5.98 A	6 A	6 A	5.58 A
Peak-to-peak Arus Output	0.26 A	1.74 A	2.17 A	12.4 A

Tabel 2. Hasil Pengujian Pada Sistem Tanpa Pengendali CCM

Parameter	<i>Induktansi Buck Converter</i>			
	40 mH	10 mH	5 mH	1 mH
Tegangan Input	100 V	100 V	100 V	100 V
Arus Input	3.2 A	3.2 A	3.2 A	3.1 A
Tegangan Output	60 V	60 V	60 V	60 V
Peak-to-peak Tegangan Output	0.02 V	0.11 V	0.21 V	0.63 V
Arus Output	5.99 A	5.98 A	5.97 A	6.06 A
Peak-to-peak Arus Output	0.08 A	0.33 A	0.67 A	1.91 A

Berdasarkan tabel 1 dan 2 serta grafik pada Gambar 6, jelas terlihat bahwa penambahan pengendali CCM menurunkan riak arus keluaran secara konsisten pada semua nilai induktansi, dengan manfaat yang makin besar ketika L diperkecil. Pada L = 40 mH, riak arus turun dari 0,269 $Ap-p$ menjadi 0,084 $Ap-p$ ($\approx 3,2 \times$ lebih kecil); pada L = 10 mH turun dari 1,748 A menjadi 0,337 A ($\approx 5,2 \times$); dan yang paling menonjol pada L = 1 mH turun dari 12,44 A menjadi 1,918 A ($\approx 6,5 \times$). Tren pada grafik memperlihatkan jarak antarkurva (tanpa CCM vs dengan CCM) yang makin melebar seiring L mengecil, menegaskan bahwa kontrol menjaga operasi tetap CCM sekalipun induktor kecil. Dampak langsungnya juga tampak pada riak tegangan keluaran yang menurun tajam—misalnya pada L = 10 mH dari 4,855 V menjadi 0,11 V ($\approx 44 \times$) dan pada L = 1 mH dari 8,536 V menjadi 0,63 V ($\approx 13,6 \times$) serta tegangan output yang konstan di 60 V pada seluruh skenario dengan CCM. Selain itu, arus input lebih stabil ($\approx 3,2$ A) sehingga alih daya lebih konsisten. Secara keseluruhan, kontrol CCM membuat sistem jauh lebih toleran terhadap induktor kecil tanpa mengorbankan kestabilan maupun kualitas daya.



Gambar 6. Grafik Riak Arus Induktor

V. SIMPULAN

- Pengendali yang diusulkan (loop tegangan + loop arus + valley clamp + anti-windup) berhasil menjaga CCM pada berbagai nilai induktansi (40 mH s.d. 1 mH) dan variasi beban (R dan R-L); arus induktor tidak menyentuh nol.
- Riak arus keluaran turun signifikan: $3,2 \times$ hingga $6,5 \times$ lebih kecil dibanding tanpa CCM. Kasus terberat L = 1 mH menurun dari 12,44 $Ap-p$ menjadi 1,918 $Ap-p$ (-84,6%).
- Riak tegangan keluaran ikut merosot tajam ($\approx 6,7 \times$ hingga $44 \times$), sekaligus menjaga tegangan output tetap 60 V pada semua skenario dengan CCM.
- Pada beban induktif (R-L) yang secara alami minim redaman, pengendali memberikan redaman aktif sehingga osilasi output dan riak arus induktor tetap kecil dan operasi stabil.
- Dengan performa ini, konverter tetap layak memakai induktor lebih kecil (ukuran/biaya lebih rendah, respons dinamis lebih cepat) tanpa mengorbankan mutu daya.

- Penurunan riak arus mengimplikasikan stres komponen (arus riak kapasitor, pemanasan $I^2 \cdot ESR$, dan EMI) yang lebih rendah, sehingga keandalan sistem berpotensi meningkat.

Saran untuk tahap berikutnya adalah dapat memprioritaskan validasi perangkat keras untuk mengonfirmasi temuan simulasi, termasuk pengukuran efisiensi, profil temperatur, dan EMI terhadap standar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. W. Erickson and D. Maksimovic, “Fundamentals_of_Power_Electronics,” Springer Science & Business Media, 2007.
- [2] Y. Guan, C. Cecati, J. M. Alonso, and Z. Zhang, “Review of High-Frequency High-Voltage-Conversion-Ratio DC–DC Converters,” IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, vol. 2, no. 4, pp. 374–389, 2021.
- [3] K. V. G. Raghavendra et al., “A Comprehensive Review of DC–DC Converter Topologies and Modulation Strategies with Recent Advances in Solar Photovoltaic Systems,” Electronics (Basel), vol. 9, no. 1, 2020.
- [4] R. N. Amalia, W. Kusuma, and H. A. Yuniq, “Desain dan Analisa Closed Loop Boost Converter Terintegrasi Solar PV Berbasis Fuzzy Logic Controller,” JIRE (Jurnal Informatika dan Rekayasa Elektronik), vol. 6, no. 1, pp. 130–139, 2023.
- [5] J. M. Enrique, A. J. Barragán, E. Durán, and J. M. Andújar, “Theoretical Assessment of DC/DC Power Converters’ Basic Topologies. A Common Static Model,” Applied Sciences, vol. 8, no. 1, 2018, doi: 10.3390/app8010019.
- [6] F. M. Serra, F. D. Esteban, and O. D. Montoya, “Control of DC-DC boost converter in discontinuous conduction mode feeding a constant power load,” Results in Engineering, vol. 23, p. 102732, 2024.
- [7] D. Scirè, G. Vitale, M. Ventimiglia, and G. Lullo, “Non-Linear Inductors Characterization in Real Operating Conditions for Power Density Optimization in SMPS,” Energies (Basel), vol. 14, no. 13, 2021.
- [8] G. Guérin and G. A. Rincón-Mora, “Compact Switched-Inductor Power Supplies: Design Optimization with Second-Order Core Loss Model,” Electronics (Basel), vol. 13, no. 15, 2024.
- [9] G. A. Munoz Hernandez, J. F. Guerrero-Castellanos, and R. A. Acosta-Rodriguez, “Applying a Gain Scheduled Fractional Order Proportional Integral and Derivative Controller to a Quadratic Buck Converter,” Fractal and Fractional, vol. 9, no. 3, 2025.
- [10] P. V Nandankar, P. P. Bedekar, and P. K. V Dhawas, “Variable switching frequency control for efficient DC-DC converter,” Mater Today Proc, vol. 51, pp. 515–521, 2022.
- [11] H.-C. Kim, M. Biswas, and J.-W. Park, “Discontinuous Conduction Mode Analysis of Two-Phase Interleaved Buck Converter With Inversely Coupled Inductor,” IEEE Access, vol. 12, pp. 91944–91956, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3421925.
- [12] P. Lezynski, R. Smolenski, H. Loschi, D. Thomas, and N. Moonen, “A novel method for EMI evaluation in random modulated power electronic converters,” Measurement, vol. 151, p. 107098, 2020.
- [13] R. C. Alvarado-Maldonado, M. Ponce-Silva, and G. S. Olivar-Castellanos, “Assessment of the Current and Voltage Ripples of a Buck Converter as a Driver for LEDs Using a Non-Resistive Model,” Eng, vol. 4, no. 2, pp. 1377–1392, 2023.
- [14] S. Surya, M. K. Srinivasan, and S. Williamson, “Modeling of Average Current in Non-Ideal Buck and Synchronous Buck Converters for Low Power Application,” Electronics (Basel), vol. 10, no. 21, 2021, doi: 10.3390/electronics10212672.
- [15] R. Li, T. O’Brien, J. Lee, J. Beecroft, and K. Hwang, “Analysis of Parameter Effects on the Small-Signal Dynamics of Buck Converters with Average Current Mode Control,” Journal of Power Electronics, vol. 12, no. 3, pp. 399–409, 2012.
- [16] C. Jiang, C. Chai, C. Han, and Y. Yang, “A high performance adaptive on-time controlled valley-current-mode DC–DC buck converter,” Journal of Semiconductors, vol. 41, no. 6, p. 62402, Jun. 2020.
- [17] C. A. Iordache and M. Bodea, “Analysis and Design of a High Efficiency Current Mode Buck Converter with I2C Controlled Output Voltage,” Romanian Journal of Information Science and Technology (ROMJIST), vol. 23, no. 2, pp. 188–203, 2020, [Online]. Available: <https://www.romjist.ro/full-texts/paper647.pdf>

- [18] N. Fuada and I. Husnaini, “Rancang Bangun Buck Converter dengan Kontrol PID Berbasis Mikrokontroller Arduino,” *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, vol. 4, no. 2, pp. 781–791, 2023.
- [19] Á. Hoyo, T. Hägglund, J. L. Guzmán, and J. C. Moreno, “A practical solution to the saturation problem in feedforward control for measurable disturbances,” *Control Eng Pract*, vol. 139, p. 105636, 2023.