

# Pengembangan Model *Boost-Buck* untuk Mempertinggi Stabilitas Tegangan Keluaran Konverter DC-ke-DC

Freddy Kurniawan<sup>1)</sup>

**Abstract**— This paper presented a novel boost-buck converter to provide the DC-DC converter. The converter consists of a cascaded configuration of the boost and buck converter. The boost converter supplied the voltage for the buck converter by converting the input voltage to the shared capacitor voltage with four modes operation: idle, up-transient, boost, and down transient. Meanwhile, the buck converter converted the shared capacitor voltage to the output voltage. To provide the fast-transient and low-ripple output-voltage, the buck converter responded the overshoot or undershoot of the output voltage by directly increasing or decreasing the on/off time of switching pulse. As the results, the transient response can be reduced to 1  $\mu$ s and the ripple output-voltage can be improved to 20 mV for the 5 A load current.

**Key Words** — DC-DC Converter, Boost-buck, Fast-transient, Low-ripple

**Abstrak**— Pada artikel ini dibahas model *boost-buck* untuk membentuk konverter DC-ke-DC. Konverter ini tersusun dari konverter *boost* dan *buck*. Konverter *boost* mengonversi tegangan masukan menjadi tegangan di kapasitor bersama dengan empat mode operasi: tanpa beban, transisi-naik, *boost*, dan transisi-turun. Sementara itu konverter *buck* mengonversi tegangan di kapasitor bersama menjadi tegangan keluaran. Untuk memperkecil waktu transien dan tegangan kerut, konverter *buck* menanggapi kemungkinan naik/turunnya tegangan keluaran dengan menurunkan/menaikkan waktu *on/off* pulsa *switching*. Konverter *boost-buck* ini mempunyai waktu transien 1 mikrodetik dan tegangan kerut 20 mV pada beban 5 A.

**Kata Kunci**— Konverter DC-ke-DC, Boost-buck, waktu transien, tegangan kerut.

## I. PENDAHULUAN

Saat ini, konverter DC-ke-DC banyak dikembangkan karena mempunyai berbagai keunggulan, di antaranya adalah: bentuknya yang lebih kompak dan mempunyai efisiensi tinggi [1]-[3]. Terdapat dua jenis konverter yang sering digunakan, yaitu: *buck* dan *boost*. Konverter *buck* digunakan untuk menurunkan tegangan masukan dan konverter *boost* untuk menaikkan tegangan. Agar suatu konverter dapat menaikkan dan menurunkan tegangan masukan dan juga mempunyai kisaran tegangan masukan lebih besar, dikembangkanlah konverter dengan konfigurasi *buck-boost* [4][5].

Konverter model *buck-boost* ini telah mengalami banyak pengembangan melalui berbagai penelitian. Namun hingga kini konverter model *buck-boost* ini masih mempunyai kelemahan. Salah satunya adalah kurang cepatnya konverter ini dalam mempertahankan kestabilan tegangan keluaran. Perubahan mendadak arus yang ditarik beban dapat mengakibatkan terjadinya penyimpangan tegangan keluaran terhadap tegangan referensi yang telah ditetapkan.

Pada konverter jenis *buck-boost*, stabilitas tegangan keluaran ditentukan oleh performa bagian *boost*. Pada konverter *boost*, naik/turunnya tegangan keluaran tidak dapat langsung dimitigasi dengan menaikkan/menurunkan waktu *on/off* atau siklus kerja pulsa *switching*. Agar dapat menanggapi perubahan beban dengan cepat, konverter *boost* biasanya menggunakan beberapa *mode* operasi. Namun perpindahan mode operasi dapat mengganggu stabilitas tegangan keluaran. Oleh karena itu, beberapa metode untuk melakukan perpindahan mode secara *smooth* telah dikembangkan oleh para peneliti [6][7].

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk menstabilkan tegangan keluaran. Kudva dkk. [8] telah mengembangkan metode PWM berdasarkan beban keluaran. Dari metode ini, tegangan kerut dapat diminimalkan hingga 27 mV pada beban 2 mA. Selanjutnya, dengan menggunakan metode *synchronous double-pumping*, Wu dkk. [9] telah dapat menurunkan waktu transien menjadi 2,4 mikrodetik pada beban 400 mA. Waktu transien dapat diturunkan lagi oleh Jung dkk. [10] menjadi 155 mikrodetik/V pada beban 100 mA dengan metode *adaptive direct path skipping*.

Beberapa peneliti juga berupaya menurunkan waktu transien mempertinggi frekuensi *switching*. Dengan modulasi *on/off* pada frekuensi *switching* 3,3 MHz, Wang dkk. [11] dapat menurunkan waktu transien menjadi 1,5 – 2,7 mikrodetik. Sementara itu, dengan modulasi kapasitansi dan frekuensi *switching* 25 MHz, Bahry dkk. [12] dapat menurunkan tegangan kerut menjadi 16 mV pada beban 100 mA.

Penggunaan frekuensi *switching* yang lebih tinggi memang telah dapat menurunkan waktu transien sehingga dapat meningkatkan kestabilan tegangan keluaran. Namun di sisi lain hal ini akan menaikkan *switching loss* karena ketidak-idealitas komponen *switching* [13]. Beberapa penelitian juga telah dilakukan untuk memitigasi hal tersebut. Salah satunya adalah menggunakan metode *soft switching* yaitu *zero*

<sup>1)</sup> Freddy Kurniawan merupakan dosen Program Studi Teknik Elektro, Sekolah Tinggi Teknologi Adisutjipto, Yogyakarta, Indonesia; email [freddykurniawan@stta.ac.id](mailto:freddykurniawan@stta.ac.id)

*voltage/current switching*. Penggunaan metode ini dapat meningkatkan efisiensi konversi maksimum menjadi di atas 92 % [14]-[15]. Banyaknya pengembangan yang telah dilakukan pada konverter *buck-boost* telah menjadikan konverter ini mempunyai kompleksitas rangkaian elektronis dan algoritme yang cukup tinggi. Hal ini tentu akan meningkatkan biaya implementasi dan ukuran konverter.

Pada penelitian ini diajukan model baru bagi sebuah konverter DC-ke-DC, yaitu model *boost-buck*. Konverter model baru ini mempunyai fungsi sama dengan model konvensional *buck-boost* namun konverter ini mempunyai tingkat kompleksitas lebih rendah sehingga akan lebih mudah, murah, dan lebih efisien dalam implementasinya. Konverter *buck-boost* dan *boost-buck* dapat menaikkan atau menurunkan tegangan masukan. Perbedaan mendasarnya adalah terletak pada bagian yang harus menanggapi permintaan arus keluaran secara cepat. Pada model konvensional *buck-boost*, bagian *boost* bertugas menanggapi permintaan arus keluaran; sementara itu pada model *boost-buck*, yang harus menanggapi permintaan arus keluaran adalah bagian *buck*.

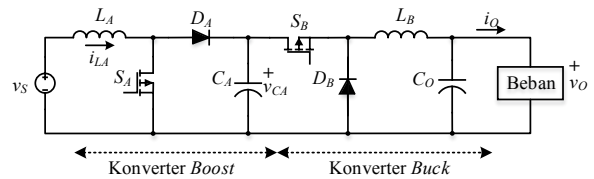
Pada konverter *buck*, mitigasi atas penyimpangan tegangan keluaran dapat dilakukan dengan lebih sederhana daripada konverter *boost*, yaitu dengan menaik-turunkan siklus kerja pulsa *switching*. Konverter *buck* juga tidak memerlukan beberapa mode operasi untuk menanggapi perubahan permintaan arus beban, sehingga metode perpindahan mode secara *smooth* tidak diperlukan. Secara sederhana, penurunan tegangan keluaran dapat dimitigasi dengan mengaktifkan saklar khusus yang dapat menyalurkan arus ekstra ke keluaran sebagaimana yang telah dilakukan Yu dkk. [16]. Metode ini telah dikembangkan oleh Shao dkk. dengan menggunakan sistem multifase [17] dan saklar ganda semi-kuadrat oleh Veerachary [18].

## II. KONVERTER MODEL BOOST-BUCK

Konverter model *boost-buck* biasa difungsikan sebagai konverter DC-ke-AC dengan *offset* DC tertentu. Fu dkk. [19] telah mengembangkan konverter model *boost-buck* pada sistem *Wireless Power Transfer* pada frekuensi *switching* 13,56 MHz dengan efisiensi 70 %. Liu dkk. [20] telah mengembangkan konverter ini untuk mendukung pengisian baterai pada *battery energy storage systems* (BESS). Selanjutnya, Li dkk. [21] telah mengembangkan sistem pengisian baterai menggunakan frekuensi *switching* 12 kHz dengan daya keluaran hingga 15 kW pada tegangan 250 V. Sementara itu, Gupta dan Venkataraman [22] telah mengembangkan sistem inverter DC-ke-AC menggunakan metode *Stored Energy Modulation* (SEM).

Model *boost-buck* jarang dikembangkan para peneliti sebagai konverter DC-ke-DC. Konverter ini mempunyai skema elektronis dasar sebagaimana Gambar 1. Konverter ini terdiri atas dua konverter, yaitu konverter *boost* dan konverter *buck*. Konverter *boost* menerima tegangan masukan ( $v_s$ ) dan dapat menaikkan tegangan masukan jika nilai  $v_s$  masih di bawah target. Konverter

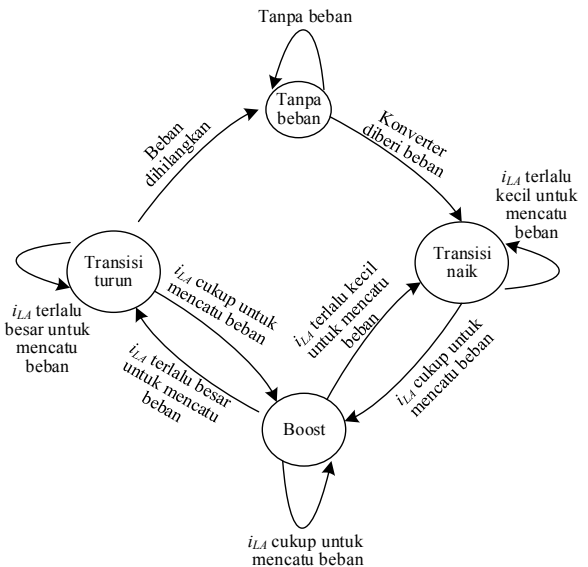
ini akan menyimpan energi listrik dalam kapasitor bersama  $C_A$ . Nilai tegangan di  $C_A$  selalu lebih tinggi daripada tegangan keluaran  $v_o$ . Sedangkan konverter *buck* mendapat masukan tegangan dari  $C_A$ . Tegangan tersebut akan diturunkan oleh konverter ini menjadi tegangan keluaran  $v_o$ .



Gambar 1. Rangkaian dasar konverter *boost-buck*

### A. Pengembangan Mode Operasi Konverter Boost

Konverter *boost* dikendalikan oleh algoritma yang membaca nilai tegangan  $v_s$ ,  $v_{CA}$ ,  $v_o$ , dan arus  $i_{LA}$ , and  $i_o$  dengan laju cuplikan 50 kSPS. Frekuensi *switching*  $S_A$  adalah 50 kHz. Konverter dioperasikan dalam empat mode, yaitu: tanpa beban, transisi-naik, *boost*, dan transisi-turun. Diagram transisi keadaan dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram transisi keadaan pada konverter *boost*

#### 1) Mode tanpa Beban

Mode tanpa beban terjadi pada saat konverter dalam kondisi tanpa beban. Pada keadaan ini, konverter telah menyimpan sejumlah energi potensial di kapasitor bersama  $C_A$ . Jika  $v_o$  merupakan tegangan keluaran konverter dan  $v_{CA}$  merupakan tegangan di kapasitor bersama  $C_A$ , maka energi potensial yang tersimpan di  $C_A$  yang dapat digunakan untuk mencatu beban sehingga tegangan beban tidak kurang dari  $v_o$  mengikuti Persamaan (1).

$$E_{CA} = \frac{1}{2} C_A (v_{CA}^2 - v_o^2) \quad (1)$$

Pada saat konverter nantinya diberi beban yang menarik arus secara undak, kebutuhan arus tersebut tidak dapat dipenuhi secara langsung oleh induktor *boost*  $i_{LA}$  karena arus di sebuah induktor tidak dapat naik secara undak (*step-up*) maupun turun secara undak (*step-down*).

Untuk mengatasi hal tersebut, mode operasi konverter *boost* diubah menjadi transisi-naik. Pada mode ini, kebutuhan arus akan dipenuhi oleh energi yang tersimpan di kapasitor bersama  $C_A$ ; sementara itu, energi dari sumber tegangan sepenuhnya disalurkan ke  $L_A$  agar  $i_{LA}$  dapat naik secara cepat untuk nantinya segera mencatu beban.

Pada mode tanpa beban ini, nilai  $v_{CA}$  lebih tinggi daripada  $v_O$ , sehingga terdapat sejumlah energi  $E_{CA}$  yang dapat digunakan untuk mencatu beban jika arus beban naik secara undak. Jika mode transisi-naik terjadi selama  $t_{up}$ , maka energi yang dibutuhkan untuk mencatu beban selama mode transisi-naik mengikuti Persamaan (2).

$$E_{O(up)} = v_O \cdot i_O \cdot t_{up} \quad (2)$$

Nilai maksimal  $t_{up}$  terjadi pada saat terjadi kenaikan arus secara undak dari kondisi tanpa beban menjadi beban penuh. Dengan kata lain terjadi perubahan arus secara undak dari  $i_O = 0$  menjadi  $i_O = i_{O(max)}$ . Perubahan tersebut akan membutuhkan waktu transien paling lama. Dalam keadaan ini, energi yang dibutuhkan mengikuti Persamaan (3).

$$E_{O(max)} = v_O \cdot i_{O(max)} \cdot t_{up(max)} \quad (3)$$

Agar kebutuhan energi selama  $t_{up}$  dapat terpenuhi, maka  $E_{O(up)}$  harus sama dengan  $E_{CA}$ . Sehingga, pada saat konverter tanpa beban, tegangan yang harus ada di  $C_A$  dapat didefinisikan sebagaimana Persamaan (4).

$$v_{CA} = v_O \sqrt{\frac{2 \cdot i_{O(max)} \cdot t_{up(max)}}{v_O \cdot C_A} + 1} \quad (4)$$

### 2) Mode Transisi-naik

Pada arus beban naik secara undak, mode operasi konverter *boost* diubah ke transisi-naik. Pada mode ini, siklus kerja saklar *boost*  $S_A$  dijadikan 100 %. Pada keadaan ini, energi dari sumber daya  $v_S$  sepenuhnya disalurkan ke  $L_A$  sehingga  $i_{LA}$  naik dengan laju mengikuti Persamaan (5).

$$\frac{di_{LA}(t)}{dt} = \frac{v_S}{L_A} \quad (5)$$

Mode transisi-naik akan berlangsung hingga  $i_{LA}$  naik sehingga energi yang mengalir di  $L_A$  sama dengan energi yang diberikan ke beban. Dikarenakan sistem dimodelkan menggunakan komponen ideal, dengan menggunakan hukum kekekalan energi,  $i_{LA}$  juga dapat dicari dengan Persamaan (6).

$$i_{LA} = \frac{i_O \cdot v_O}{v_S} \quad (6)$$

Sementara itu waktu terjadinya mode transisi-naik dapat ditentukan dengan mengintegrasikan ruas kiri dan kanan Persamaan (5) sehingga didapat Persamaan (7).

$$\begin{aligned} t_{up} &= \frac{\Delta i_{LA} \cdot L_A}{v_S} \\ &= \frac{i_{O,LA} \cdot v_O}{v_S^2} \end{aligned} \quad (7)$$

Nilai maksimal  $t_{up(max)}$  akan terjadi pada saat terjadi kenaikan arus secara undak sehingga arus beban menjadi maksimal sebagaimana Persamaan (8).

$$t_{up(max)} = \frac{i_{O(max)} \cdot L_A \cdot v_O}{v_S^2} \quad (8)$$

### 3) Mode Boost

Mode *boost* terjadi pada saat arus yang mengalir di  $i_{LA}$  cukup untuk mencatu beban. Pada saat ini, energi yang diberikan oleh konverter *boost* sama dengan energi yang dibutuhkan oleh konverter *buck*. Konverter *boost* dioperasikan pada mode kontinu dan siklus kerja  $S_A$  dapat dihitung menggunakan Persamaan (9).

$$D_{SA} = \frac{v_{CA} - v_S}{v_{CA}} \quad (9)$$

Sementara itu arus yang mengalir di induktor *boost* dapat pula dihitung menggunakan Persamaan (10).

$$i_{LA} = \frac{i_D}{1 - D_{SA}} \quad (10)$$

Pada saat konverter dioperasikan pada mode *boost*, konverter tetap menyimpan sejumlah energi di  $C_A$ . Energi tersebut digunakan kembali untuk mencatu beban pada saat terjadi kenaikan arus keluaran secara undak menjadi  $i_{O(max)}$ . Kenaikan arus keluaran tersebut memberikan konsekuensi harus berubahnya arus di induktor dari  $i_{LA}$  menjadi  $i_{LA(max)}$ . Dikarenakan perubahan dari  $i_{LA}$  menjadi  $i_{LA(max)}$  tidak dapat berlangsung secara undak, maka mode konverter diubah ke transien-naik kembali.

Agar energi di  $C_A$  dapat mencukupi jika mode operasi diubah ke transien-naik kembali, maka pada saat arus keluaran sebesar  $i_O$ , tegangan di  $C_A$  yang harus tersedia dapat ditentukan dengan Persamaan (11).

$$v_{CA} = v_O \sqrt{\frac{2 \cdot i_{O(max)} \cdot (i_{O(max)} - i_O) \cdot L_A}{C_A \cdot v_S^2} + 1} \quad (11)$$

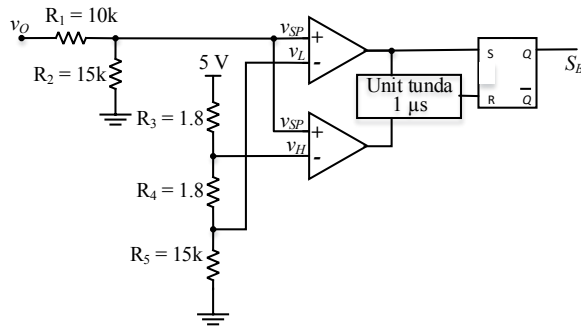
### 4) Mode Transisi-turun

Mode ini dioperasikan pada saat arus beban mengalami penurunan secara undak. Dikarenakan arus pada induktor *boost* tidak dapat berubah secara undak, maka arus yang terlalu besar pada induktor *boost* dapat menyebabkan kenaikan tegangan pada keluaran. Untuk itu, pada mode ini, siklus kerja saklar  $S_A$  dijadikan 0 % sehingga laju perubahan arus pada induktor *boost*  $L_A$  mengikuti Persamaan (12)

$$\frac{di_{LA}(t)}{dt} = \frac{v_S - v_{CA}}{L_A} \quad (12)$$

### B. Pengembangan Konverter Buck

Untuk membentuk fungsi konverter dengan tegangan keluaran stabil, maka konverter *buck* dikembangkan dengan teknik *on-time* variabel. Dengan teknik ini, durasi *on* pada saklar  $S_B$  dapat dinaikkan jika terdapat kenaikan beban atau diturunkan jika terdapat pengurangan beban. Gambar 3 menunjukkan skema elektronis riangkas generator pulsa yang digunakan untuk *switching* pada saklar  $S_B$ .



Gambar 3. Generator pulsa untuk saklar  $S_B$  pada konverter *buck*

Pada skema di atas, sebuah pulsa akan dikirim ke masukan S flip-flop RS jika  $v_{SP} < v_L$ , kemudian rangkaian tersebut akan mengeluarkan pulsa *enable* ke  $S_B$ . Sementara itu, jika  $v_{SP} > v_H$ , sebuah pulsa akan dikirim ke masukan R flip-flop RS sehingga saklar  $S_B$  akan di-*disable*. Dengan menggunakan rangkaian pembagi tegangan yang dibentuk  $R_3$ ,  $R_4$ , dan  $R_5$ , nilai  $v_L$  dan  $v_H$  telah ditetapkan menjadi 4,9988 V dan 4,9994 V. Dengan demikian  $S_B$  akan *on* jika  $v_O < 14,9964$  V dan akan *off* jika  $v_O > 14,9982$  V. Batasan tegangan  $v_L$  dan  $v_H$  dapat digunakan untuk mempertahankan tegangan keluaran stabil di sekitar 15 V. Sebuah unit tunda 1 mikrodetik digunakan untuk membatasi frekuensi *switching* maksimal sebesar 1 MHz. Langkah ini ditempuh untuk mengurangi *switching loss*.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

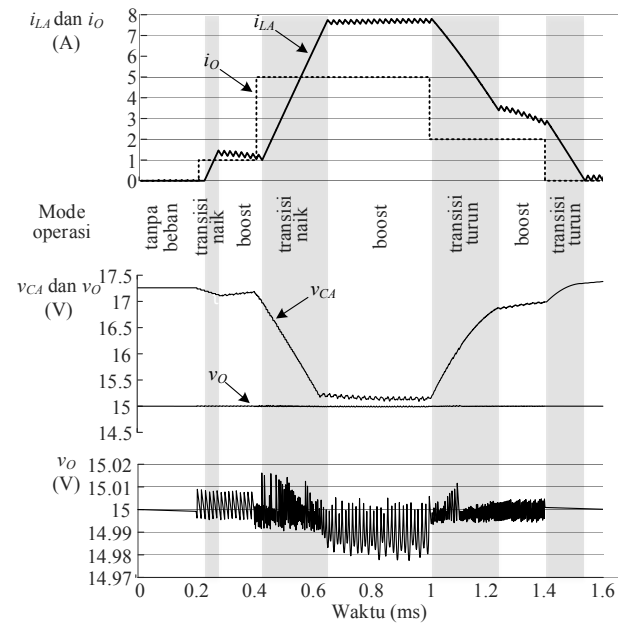
Rangkaian konverter *boost* terdiri dari  $L_A=330 \mu\text{H}$ , mosfet  $S_A$ ,  $D_2$ , dan  $C_A=510 \mu\text{F}$ ; sementara itu rangkaian konverter *buck* terdiri dari mosfet  $S_B$ ,  $D_3$ , dan  $L_B=0,1 \mu\text{H}$ . Sebuah kapasitor tapis  $C_O=4700 \mu\text{F}$  di bagian keluaran ditambahkan untuk meredam tegangan kerut.

Pada penelitian ini, sebagai percobaan, ditetapkan sebuah konverter *boost-buck* dengan tegangan masukan  $v_S=10$  V, tegangan keluaran  $v_O=15$  V, dan arus keluaran maksimal  $i_{O(max)}=5$  A. Sistem dianggap telah diperasakan cukup lama, sehingga tercapai kondisi *steady-state* dalam kondisi tanpa beban.

#### C. Analisis Kinerja Konverter Boost

Untuk memperlihatkan kinerja, konverter diberi beban yang menarik arus dengan kenaikan secara undak 1 A dan 4 A. Grafik simulasi arus induktor *boost* ( $i_{LA}$ ), arus keluaran ( $i_O$ ), tegangan kapasitor bersama ( $v_{CA}$ ), dan tegangan keluaran ( $v_O$ ) pada saat konverter diberi

beban naik dan turun secara undak dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Grafik simulasi arus dan tegangan pada saat arus beban naik dan turun secara undak

Waktu transisi-naik maksimal  $t_{up(max)}$  akan menentukan penentuan tegangan di kapasitor bersama pada keadaan *steady-state*. Nilai  $t_{up(max)}$  terjadi pada saat adanya perubahan dari keadaan konverter tanpa beban ( $i_O=0$ ) menjadi keadaan konverter dengan beban penuh ( $i_O=i_{O(max)}$ ). Pada kondisi itu, tegangan di kapasitor bersama  $v_{CA}=v_O$ . Nilai siklus kerja  $S_A$  adalah  $D_{SA} = \frac{v_{CA}-v_S}{v_{CA}} = \frac{15-10}{15} = \frac{1}{3}$ . Agar bagian *boost* dapat mencatu daya yang diperlukan oleh bagian *buck*, maka besar arus yang harus mengalir di induktor *boost* adalah  $i_{LA} = \frac{i_{O(max)}}{1-D_{SA}} = \frac{5}{1-1/3} = 7,5$  A.

Waktu maksimal terjadinya mode transisi-naik adalah  $t_{up(max)} = \frac{\Delta i_{LA} \cdot L_A}{v_S} = \frac{7,5 \cdot 330 \mu}{10} = 247,5$  mikrodetik. Tegangan di kapasitor bersama pada saat tanpa beban

$$\text{sebesar } v_{CA} = 15 \sqrt{\frac{2 \cdot (5-0) \cdot 247,5 \mu \cdot \left(\frac{5-0}{5}\right)}{15 \cdot 510 \mu} + 1} = 17,26 \text{ V.}$$

Pada saat  $t=0,2$  ms, sebuah beban yang menarik arus 1 A dikenakan pada konverter tersebut. Mode operasi konverter *boost* berubah menjadi transisi-naik. Agar daya di konverter *boost* mencukupi bagi beban, maka  $i_{LA}$  harus dinaikkan menjadi  $\frac{i_O \cdot v_O}{v_S} = \frac{1 \cdot 15}{10} = 1,5$  A. Pada mode transisi-naik ini seluruh daya dari  $v_S$  dialirkan ke  $L_A$  agar dapat menaikkan  $i_{LA}$  secepat mungkin. Laju perubahan arus ini adalah  $\frac{di_{LA}(t)}{dt} = \frac{v_S}{L_A} = \frac{10}{330 \mu} = 30,3$  A/ms dan mode transisi-naik ini berlangsung selama  $t_{up} = \frac{\Delta i_{LA} \cdot L_A}{v_S} = \frac{1,5 \cdot 330 \mu}{10} = 49,5 \mu\text{s}$ .

Pada saat  $i_{LA}=1,5$  A, mode operasi konverter *boost* diubah menjadi *boost*. Pada keadaan ini, sistem masih menyimpan energi di kapasitor bersama. Energi ini dapat digunakan jika terdapat perubahan beban sehingga

arus keluaran yang ditarik menjadi 5 A ( $i_{O(max)}$ ). Perubahan arus keluaran tersebut akan menyebabkan konverter dioperasikan dalam mode transisi-naik selama  $t_{up} = \frac{\Delta i_{LA} \cdot L_A}{v_s} = \frac{(7,5-1,5) \cdot 330 \mu}{10} = 198$  mikrodetik.

Tegangan di kapasitor bersama adalah  $v_{CA} = 15 \sqrt{\frac{2,5 \cdot (5-1) \cdot 330 \mu}{510 \mu \cdot 10^2} + 1} = 16,83$  V.

Namun dalam kenyataan, sebagaimana terlihat pada Gambar 4, nilai  $v_{CA}$  dalam kenyataan adalah 17,2 V. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut. Pada saat  $t = 0$ , dengan nilai  $v_{CA} = 17,26$  V, maka sebagaimana, energi yang tersimpan di kapasitor bersama  $E_{CA} = 75,9664$  mJ. Energi tersebut terpakai selama  $t_{up} = 49,5 \mu s$  sebesar  $E_{O(up)} = v_O \cdot i_O \cdot t_{up} = 15 \times 1 \times 49,5 \mu s = 0,7425$  mJ sehingga tinggal 75,2239 mJ dengan nilai  $v_{CA} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{CA}}{C_A}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 75,2239 m}{510 \mu}} = 17,1754$  V. Dalam hal ini, sistem mendeteksi nilai  $v_{CA}$  melebihi dari nilai yang seharusnya. Namun kejadian ini tidak menjadi permasalahan berarti dikarenakan tegangan keluaran dijadikan konstan oleh konverter *buck*.

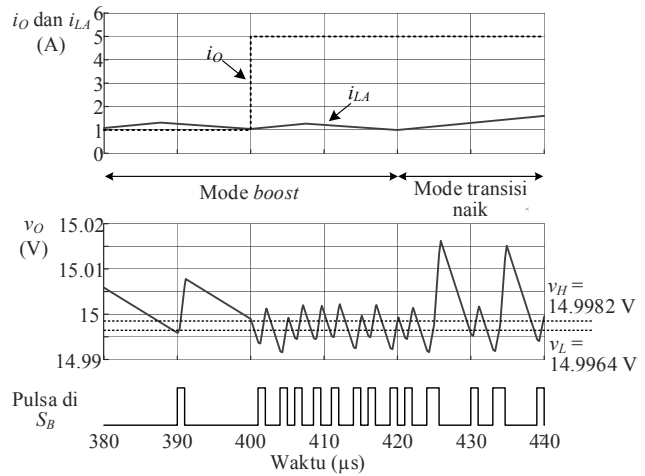
Pada saat  $t = 0,4$  ms, arus beban naik secara undak menjadi 5 A. Mode operasi konverter *boost* diubah ke transisi-naik kembali. Pada saat  $i_{LA}$  mencapai 7,5 A, mode operasi kembali diubah ke *boost*. Pada saat itu,  $i_O$  telah mencapai  $i_{O(max)}$  dan  $v_{CA}$  telah mencapai nilai minimum yang diijinkan yaitu sama dengan  $v_O$ . Dengan demikian, tidak ada lagi energi cadangan tersimpan di  $C_A$ . Dalam kondisi ini, kenaikan arus keluaran dapat mengakibatkan penurunan tegangan keluaran.

Pada saat  $t = 1$  ms, beban dikurangi sehingga arus keluaran turun secara undak menjadi 2 A. Mode operasi diubah menjadi transisi-turun dengan menjadikan siklus kerja  $S_A$  menjadi nol.  $i_{LA}$  turun dengan laju  $\frac{di_{LA}(t)}{dt} = \frac{v_s - v_{CA}}{L_A} = \frac{10 - 15}{330 \mu} = -15,15$  A/ms dalam waktu 0,12 ms sehingga menjadi 3,5 A. Selanjutnya pada saat  $t = 1,4$  ms beban keluaran ditiadakan sehingga mode operasi kembali diubah menjadi transisi-turun.

D. Stabilitas Tegangan Keluaran

Tegangan keluaran dipertahankan stabil oleh konverter *buck* menggunakan teknik pengubahan waktu *on/off* saklar  $S_B$ . Sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3, pengaktifan saklar ini dikendalikan oleh perangkat keras, sehingga nilai waktu transien ditentukan oleh kecepatan komparator.

Sebagaimana terlihat pada Gambar 5, pada saat  $i_O = 1$  A, siklus kerja  $S_B = 10$  %. Ketika  $i_O$  naik secara undak menjadi 5 A, untuk mencegah penurunan tegangan keluaran, maka waktu *off* dikurangi sehingga siklus kerja  $S_B$  naik dan tegangan keluaran kembali ke nilai yang ditentukan.



Gambar 5. Tegangan keluaran pada saat arus beban naik secara undak menjadi 5 A

Dengan teknik di atas, stabilitas tegangan keluaran dapat dimaksimalkan. Selama energi di  $C_A$  mencukupi, adanya kecenderungan penurunan tegangan karena naiknya arus keluaran dapat dihindari dengan menaikkan waktu *on* pulsa ke  $S_B$  dan adanya kecenderungan kenaikan tegangan karena turunnya arus keluaran dapat dihindari dengan menurunkan waktu *on* ke  $S_B$ .

Sebagaimana terlihat pada Gambar 5, pada saat konverter diberi beban 1 A, tegangan kerut maksimal yang terjadi adalah sekitar 10 mV. Sementara itu pada saat konverter diberi beban maksimal 5 A, tegangan kerut maksimal yang terjadi adalah 20 mV. Sementara itu, waktu transien yang dibutuhkan oleh konverter untuk menanggapi perubahan arus beban adalah sekitar 1  $\mu s$ . Nilai ini telah di bawah waktu transien konverter DC-ke-DC yang dihasilkan pada beberapa penelitian sebelumnya.

IV. KESIMPULAN

Pada penelitian ini, telah dikembangkan sebuah konverter DC-ke-DC dengan model *boost-buck*. Agar dapat menanggapi perubahan arus keluaran dengan cepat konverter *boost* bekerja dengan empat mode: tanpa beban, transisi-naik, *boost*, dan transisi-turun. Sementara itu, untuk dapat mempertahankan kestabilan tegangan keluaran, konverter *buck* dapat mengubah siklus kerja pulsa *switching* pada konverter tersebut. Dengan menggunakan frekuensi *switching* konverter *boost* sebesar 50 kHz dan konverter *buck* sebesar 1 MHz, konverter model *boost-buck* ini mempunyai stabilitas tegangan keluaran lebih tinggi daripada beberapa model konverter yang telah dikembangkan pada penelitian sebelumnya. Hal ini ditandai dengan tegangan kerut keluaran maksimal yang hanya sebesar 20 mV. Model konverter ini juga hanya membutuhkan waktu transien sekitar 1 mikrodetik untuk menanggapi kenaikan arus keluaran sebesar 5 A.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didukung dengan dana DIPA dari Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi melalui “Penelitian Kopertis” (No. 038/HB-LIT.DIP.KOP5/V/2018).

## REFERENSI

- [1] F.L. Tofoli, D.C. Pereira, W.J. Paula, D.S.O. Júnior, “Survey on non-isolated high-voltage step-up dc-dc topologies based on the boost converter”, *IET Power Electronics*, Vol. 8, Iss. 10, pp. 2044-2057, 2015.
- [2] M. Forouzes, Y.P. Siwakoti, S.A. Gorji, F. Blaabjerg, B. Lehman, B., “Step-Up DC-DC Converters: A Comprehensive Review of Voltage-Boosting Techniques, Topologies, and Applications”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 32, No. 12, pp. 9143-9178, 2017.
- [3] M.Z. Hossain, N.A. Rahim, J. Selvaraj, “Recent Progress and Development on Power DC-DC Converter Topology, Control, Design and Applications: A Review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81, pp. 205-230, 2018.
- [4] A. Chub, D. Vinnikov, R. Kosenko, E. Liivik, Wide Input Voltage Range Photovoltaic Microconverter With Reconfigurable Buck-Boost Switching Stage, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 64, No. 7, pp. 5974-5983, 2017.
- [5] S. Ding, F. Wang, A New Negative Output Buck-Boost Converter with Wide Conversion Ratio, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 64, No. 12, pp. 9322-9333, 2017.
- [6] C.H. Tsai, Y.S. Tsai, H.C. Liu, “A Stable Mode-Transition Technique for A Digitally Controlled Non-Inverting Buck-Boost DC-DC Converter”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 62, Iss. 1, pp. 475-483, 2015.
- [7] X.E. Hong, J.F. Wu, C.L. Wei, “98.1%-efficiency hysteretic-current-mode noninverting buck-boost DC-DC converter with smooth mode transition”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 32, No. 3, pp. 2008-2017, 2017.
- [8] S.S. Kudva, R. Harjani, “Fully Integrated Capacitive DC-DC Converter with All-Digital Ripple Mitigation Technique”, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 48, Iss. 8, pp. 1910-1920, 2013.
- [9] K.I. Wu, B.T. Hwang, C.C.P. Chen, “Synchronous Double-Pumping Technique for Integrated Current-Mode PWM DC-DC Converters Demand on Fast-Transient Response”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 32, No. 1, pp. 849-865, 2017.
- [10] Y.H. Jung, S.K. Hong, O.K. Kwon, “A High-Efficient and Fast-Transient Buck-Boost Converter using Adaptive Direct Path Skipping and On-Duty Modulation”, *Microelectronics Journal*, Vol. 70, pp. 43-51, 2017.
- [11] Z. Wang, B. Chen, L. Zhu, Y. Zheng, J. Guo, D. Chen, M., K.N. Leung, “A 3.3-MHz Fast-Response Load-Dependent-On/Off-Time Buck-Boost DC-DC Converter with Low-Noise Hybrid Full-Wave Current Sensor”, *Microelectronics Journal*, Vol. 74, pp. 1-12, 2018.
- [12] M.K. Bahry, M.E. Nozahi, E. Hegazi, “An All-Digital Low Ripples Capacitive DC-DC Converter with Load Tracking Controller”, *Integration, the VLSI Journal*, Vol. 62, pp. 123-131, 2018.
- [13] J. Dudrik, M. Pastor, M. Lacko, R. Zatkovic, “Zero-Voltage and Zero-Current Switching PWM DC-DC Converter Using Controlled Secondary Rectifier with One Active Switch and Nondissipative Turn-Off Snubber”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 33, No. 7, pp. 6012-6023, 2018.
- [14] T. Yao, C. Nan, R. Ayyanar, “A New Soft-Switching Topology for Switched Inductor High Gain Boost”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 54, No. 3, pp. 2448-2458, 2018.
- [15] S. Li, Y. Zheng, B. Wu, K.M. Smedley, A Family of Resonant Two-Switch Boosting Switched-Capacitor Converter with ZVS Operation and a Wide Line Regulation Range, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 33, No. 1, pp. 448-459, 2018.
- [16] Y. Gu, D. Zhang, Voltage Regulator Buck Converter with a Tapped Inductor for Fast Transient Response Application, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 12, pp. 6249-6254, 2014.
- [17] P. Shao, F. Chang, C. Reade, P. Ilavarasan, D. Pommerenke, An Experimental Approach for Locating the Current Distribution in Multiphase Buck Converters, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 56, No. 6, pp. 1344-1351, 2014.
- [18] M. Veerachary, Two-Switch Semiquadratic Buck Converter, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 64, No. 2, pp. 1185-1194, 2017.
- [19] M. Fu, C. Ma, X. Zhu, “A Cascaded Boost-Buck Converter for High-Efficiency Wireless Power Transfer Systems”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 10, No. 3, pp. 1972-1980, 2014.
- [20] C. Liu, J. Kan, Y. Zhi, W. Li, J. Sun, G. Cai, J. Wang, Reliable transformerless battery energy storage systems based on cascade dual-boost/buck converters, *IET Power Electronics*, Vol. 8, Iss. 9, pp. 1681-1689, 2015.
- [21] C. Li, W. Huang, R. Chao, F. Bu, C. Fan, “An Integrated Topology of Charger and Drive for Electric Buses”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 65, No. 6, pp. 4471-4479, 2016.
- [22] M. Gupta, G. Venkataramanan, A DC-to-Three-Phase Boost-Buck Inverter with Stored Energy Modulation and a Tiny DC-Link Capacitor, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 53, No. 2, pp. 1280-1288, 2017.