

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor Konversi

Kendaraan bermotor listrik merupakan jenis kendaraan yang menggunakan motor listrik sebagai penggerak utama. Motor listrik memperoleh energi dari baterai, kemudian mengubah energi listrik tersebut menjadi energi mekanik untuk menggerakkan roda kendaraan. Teknologi ini memungkinkan kendaraan beroperasi tanpa mesin pembakaran dalam, sehingga lebih ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi gas buang secara langsung.

Dalam perkembangannya, kendaraan bermotor listrik hadir dalam berbagai bentuk, mulai dari sepeda listrik, sepeda motor listrik, hingga mobil listrik. Setiap jenis kendaraan memiliki konfigurasi dan spesifikasi teknis yang berbeda, bergantung pada kapasitas baterai, jenis motor listrik yang digunakan, serta sistem kendali yang diterapkan. Dibandingkan kendaraan konvensional, kendaraan listrik memiliki keunggulan berupa efisiensi energi yang lebih tinggi, biaya operasional yang lebih rendah, serta minimnya emisi gas rumah kaca. Hal ini menjadikannya sebagai salah satu solusi potensial dalam upaya mewujudkan sistem transportasi berkelanjutan di masa depan.

Seiring perkembangan teknologi, penggunaan baterai sebagai sumber energi kendaraan listrik juga semakin maju. Baterai lithium-ion saat ini menjadi pilihan utama karena memiliki kepadatan energi yang tinggi, umur pakai yang relatif panjang, serta kemampuan pengisian ulang yang baik. Meski demikian, penelitian terus dilakukan untuk menemukan teknologi baterai alternatif yang lebih murah, lebih ringan, dan lebih ramah lingkungan, seperti baterai solid-state maupun baterai berbasis natrium. Dengan meningkatnya permintaan pasar serta dukungan kebijakan pemerintah terhadap pengembangan kendaraan listrik, teknologi ini diperkirakan akan semakin terjangkau dan digunakan secara luas pada masa mendatang. Dalam konteks penelitian ini, motor listrik yang digunakan berasal dari konversi kendaraan bermotor konvensional berbahan bakar fosil menjadi kendaraan listrik. Proses konversi ini

umumnya melibatkan penggantian mesin pembakaran dalam dengan motor listrik, serta integrasi sistem penyimpanan energi berbasis baterai dan konverter daya. Dengan demikian, studi mengenai konverter DC-DC, khususnya buck-boost converter, menjadi penting karena berperan dalam manajemen distribusi energi antara baterai utama bertegangan tinggi dan sistem kelistrikan kendaraan yang membutuhkan tegangan rendah.

2.2 Buck-Boost Konverter

Buck-boost converter merupakan salah satu jenis konverter DC-DC yang sederhana namun fleksibel karena mampu berfungsi sebagai penurun tegangan (buck) maupun penaik tegangan (boost) hanya dengan mengatur duty cycle dari saklar yang digunakan. Topologi dasar konverter ini terdiri atas sumber tegangan DC, sebuah MOSFET atau IGBT sebagai saklar, dioda, induktor, dan kapasitor output [3]. Berbeda dengan buck converter yang hanya mampu menurunkan tegangan serta boost converter yang hanya menaikkan tegangan, buck-boost converter dapat melakukan kedua fungsi tersebut dalam satu rangkaian sederhana. Ciri khas dari buck-boost konvensional adalah tegangan keluarannya memiliki polaritas terbalik terhadap tegangan input (inverting). Dalam aplikasi kendaraan listrik hasil konversi, buck-boost converter dapat dimanfaatkan untuk menurunkan tegangan dari baterai utama bertegangan 72V menjadi 12V dalam rangka menyuplai beban kelistrikan kendaraan seperti lampu, klakson, dan sistem kontrol. Selain itu, konverter ini juga dapat digunakan untuk menaikkan tegangan dari sumber eksternal bertegangan 48V menjadi 72V untuk proses pengisian ulang baterai utama. Keunggulan dari penggunaan buck-boost converter adalah kesederhanaan rangkaian, biaya implementasi yang rendah, serta kemampuannya untuk bekerja sebagai step-up maupun step-down dalam satu sistem. Dengan penggunaan frekuensi switching yang tinggi, ukuran induktor dan kapasitor juga dapat diperkecil sehingga meningkatkan efisiensi dan kepadatan daya sistem [6][1]. Lebih lanjut, buck-boost converter memiliki karakteristik operasi yang dipengaruhi oleh kondisi konduksi induktor, yaitu mode Continuous Conduction Mode (CCM) dan Discontinuous Conduction Mode (DCM). Pada CCM, arus induktor tidak pernah turun hingga nol

dalam satu siklus switching sehingga tegangan output lebih stabil dengan riak yang kecil, sedangkan pada DCM arus induktor dapat turun hingga nol yang mengakibatkan riak lebih besar namun memungkinkan penggunaan komponen yang lebih kecil. Pemilihan nilai induktor dan kapasitor yang tepat sangat menentukan mode operasi ini, dan untuk aplikasi kendaraan listrik umumnya diusahakan agar konverter bekerja dalam CCM guna memperoleh kestabilan tegangan serta efisiensi yang lebih baik.

2.2.1 Prinsip Operasi

Buck-boost converter merupakan konverter DC-DC yang bekerja dengan cara menyimpan energi pada induktor saat saklar aktif (ON) dan melepaskan energi tersebut ke beban saat saklar tidak aktif (OFF). Prinsip kerja ini dikendalikan oleh teknik *Pulse Width Modulation* (PWM), di mana variasi *duty cycle* menentukan besar tegangan keluaran yang dihasilkan. Dengan mengatur *duty cycle*, konverter dapat menghasilkan tegangan output yang lebih rendah maupun lebih tinggi dibandingkan tegangan input.

Saat saklar ON, sumber tegangan DC mengalirkan energi ke induktor sehingga arus induktor meningkat dan energi tersimpan dalam bentuk medan magnet. Pada kondisi ini, dioda berada dalam keadaan *reverse bias* sehingga beban tidak menerima energi secara langsung dari input. Selanjutnya, ketika saklar OFF, induktor akan melepaskan energi yang tersimpan dan menyalurkannya ke kapasitor serta beban melalui dioda. Pada kondisi ini, polaritas tegangan output menjadi berlawanan dengan tegangan input (inverting). Secara matematis, hubungan tegangan output dengan input dalam kondisi ideal (Continuous Conduction Mode/CCM) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$V_o = -\frac{D}{1-D} \cdot V_{in}$$

dengan:

- V_o = tegangan keluaran (output)
- V_{in} = tegangan masukan (input),
- D = duty cycle ($0 < D < 1$).

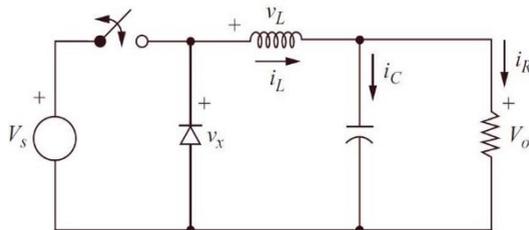
Dari persamaan tersebut dapat diketahui bahwa untuk duty cycle $D < 0.5$ ($0.5D < 0.5$), tegangan keluaran lebih kecil dari input (mode buck), sedangkan untuk duty cycle $D > 0.5$ ($0.5D > 0.5$), tegangan keluaran lebih besar dari input (mode boost). Karakteristik inilah yang menjadikan buck-boost converter sangat fleksibel, karena mampu berfungsi sebagai penurun maupun penaik tegangan hanya dengan satu rangkaian sederhana.

Dalam aplikasi kendaraan listrik hasil konversi, prinsip operasi ini memungkinkan sistem untuk menyesuaikan tegangan sesuai kebutuhan, misalnya menurunkan tegangan baterai utama 72V menjadi 12V untuk suplai beban, atau menaikkan tegangan sumber eksternal 48V menjadi 72V untuk pengisian baterai utama. Dengan demikian, buck-boost converter menjadi solusi praktis untuk mendukung distribusi energi pada kendaraan listrik.[2], [3]

2.2.2 Konverter Penurun Tegangan

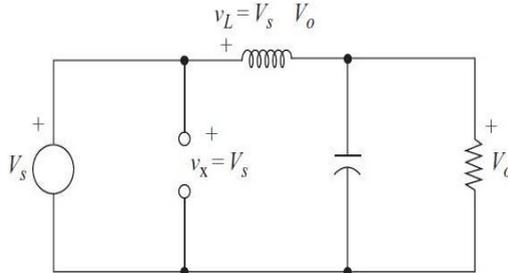
Buck converter (Konverter Penurun Tegangan) adalah konverter yang bekerja sebagai step down DC (Direct Current) dengan tegangan output lebih rendah dari tegangan ($V_o < V_s$). Prinsip kerjanya adalah menurunkan tegangan DC dengan mengatur besar duty cycle switching.

Rangkaian Buck converter pada gambar 1 terdiri dari tegangan input (V_s), saklar aktif (MOSFET), dioda, induktor, kapasitor, dan resistor. Switch pada buck converter akan bekerja terus-menerus. Kecepatan switch (dalam realisasinya) akan bergantung pada duty cycle yang digunakan.[4], [5]



Gambar 2. 1 Rangkaian buck converter

Pinsip kerja pada *buck converter* memiliki 2 kondisi yaitu pada saat saklar dalam kondisi “ON” seperti pada Gambar 2.2



Gambar 2. 2 Rangkaian buck converter saklar “ON”

Ketika dalam kondisi saklar “ON” dioda bekerja *reversed/block* sehingga suplai input mengalir ke induktor juga ke beban. Rumus matematikanya sebagai berikut:

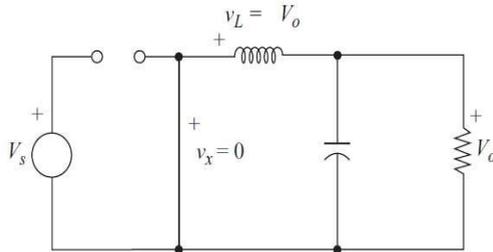
$$V_L = V_S - V_O \quad (1)$$

$$V_L(t) = L \frac{di}{dt} \quad (2)$$

$$L \frac{di}{dt} = V_S - V_O \quad (3)$$

$$V_S = L \frac{\Delta i_L^{(on)}}{DT} + V_O \quad (4)$$

$$\Delta i_{L(closed)} = \frac{(V_S - V_O)DT}{L} \quad (5)$$



Gambar 2. 3 Rangkaian buck converter saklar “OFF”

Ketika saklar dalam kondisi ”OFF” dioda bekerja *forward/unblock* sehingga energi yang disimpan di induktor dapat mengalir ke beban. Kemudian Rumus matematikanya sebagai berikut:

Saat saklar OFF:

$$v_L + v_o = 0 \quad (6)$$

$$v_L = -v_o \quad (7)$$

Dengan hukum induktor:

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (8)$$

Maka:

$$L \frac{di_L}{dt} = -v_o \quad (9)$$

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{v_o}{L} \quad (10)$$

Konverter step-down (buck) merupakan salah satu jenis konverter DC–DC yang berfungsi menurunkan tegangan masukan menjadi tegangan keluaran rata-rata yang lebih rendah.. Prinsip kerjanya didasarkan pada pengaturan siklus kerja sakelar (duty cycle), sehingga besarnya tegangan keluaran dapat diatur sesuai kebutuhan sistem.

Dalam kondisi ideal, konverter step-down terdiri atas sumber tegangan DC, sakelar elektronik, dan beban resistif. Tegangan keluaran rata-rata V_o dapat dinyatakan sebagai hasil perkalian antara tegangan masukan V_d dengan rasio siklus kerja sakelar $D = \frac{t_{on}}{T_s}$ yaitu: $V_o = D V_d$

$$V_o = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_o(t) dt = \frac{1}{T_s} \left(\int_0^{t_{on}} V_d dt + \int_{t_{on}}^{T_s} 0 dt \right) = \frac{t_{on}}{T_s} V_d = D V_d \quad (11)$$

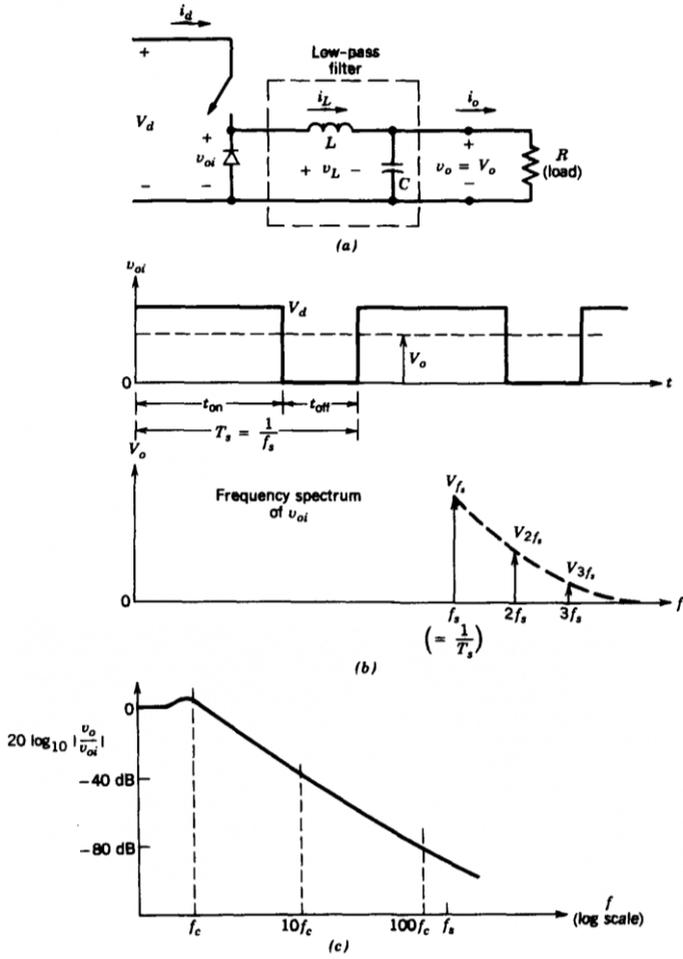
Hubungan ini menunjukkan bahwa tegangan keluaran berbanding lurus dengan duty cycle sakelar, sehingga pengendalian duty cycle memungkinkan pengaturan tegangan keluaran secara linier terhadap tegangan kendali.

Konverter step-down (buck) dapat mengatur tegangan keluaran dengan mengubah rasio siklus kerja sakelar $\frac{t_{on}}{T_s}$. Tegangan rata-rata pada sisi keluaran bervariasi secara linier terhadap tegangan pengendali, mirip dengan karakteristik penguat linier.

Dalam praktiknya, beban konverter umumnya bersifat induktif sehingga sakelar harus menangani energi induktif yang tersimpan. Tanpa rangkaian tambahan, kondisi ini berpotensi merusak sakelar dan menyebabkan tegangan keluaran berfluktuasi dari nol hingga V_d , yang tidak sesuai untuk sebagian besar aplikasi.

Untuk mengatasi hal ini digunakan dioda bebas (freewheeling diode) dan filter low-pass LC. Dioda berfungsi menyalurkan arus induktor ketika sakelar mati, sedangkan filter LC meredam harmonisa pada frekuensi pensaklaran sehingga tegangan keluaran menjadi lebih rata. Frekuensi sudut filter dipilih jauh di bawah frekuensi pensaklaran agar riak tegangan dapat ditekan secara efektif.

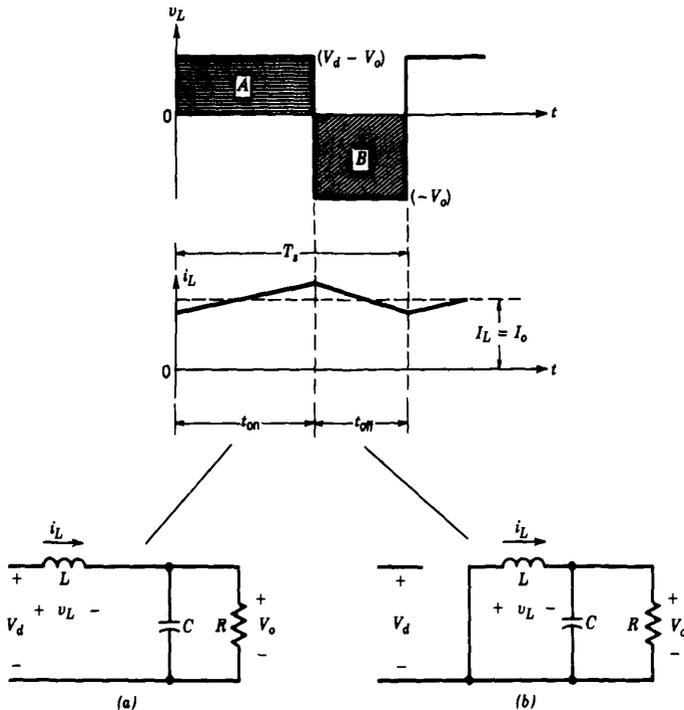
Dalam keadaan tunak, kapasitor keluaran diasumsikan cukup besar sehingga tegangan sesaat $v_o(t)$ mendekati konstan ($\approx V_o$). Arus induktor rata-rata sama dengan arus keluaran rata-rata I_o , sedangkan arus kapasitor rata-rata bernilai nol.



Gambar 2. 4 Rangkaian buck converter

2.2.2.1 Waktu Kondisi Kontinyu

Menunjukkan bentuk gelombang untuk mode operasi konduksi kontinu di mana arus induktor mengalir secara kontinu [$i_L(t) > 0$]. Ketika sakelar menyala selama durasi waktu tertentu, sakelar menghantarkan arus induktor dan dioda menjadi bias balik. Hal ini menghasilkan tegangan positif $v_L = v_d - v_o$ melintasi induktor pada Gambar 2.5 Tegangan ini menyebabkan peningkatan linear pada arus induktor i . Ketika sakelar dimatikan, karena penyimpanan energi induktif, i , terus mengalir. Arus ini sekarang mengalir melalui dioda, dan $v_L = -v_o$



Gambar 2. 5 Keadaan rangkaian konverter penurun tegangan (dengan asumsi i mengalir kontinu): (a) menyala; (b) mati

Integral tegangan induktor dalam satu periode:

$$\int_0^{T_s} v_L dt = \int_0^{t_{on}} v_L dt + \int_{t_{on}}^{T_s} v_L dt = 0 \quad (12)$$

Persamaan kesetaraan area A dan B:

$$(V_d - V_o)t_{on} = V_o(T_s - t_{on}) \quad (13)$$

Rasio tegangan output terhadap input (Duty Ratio):

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{t_{on}}{T_s} = D \quad (14)$$

Rata-rata tegangan induktor:

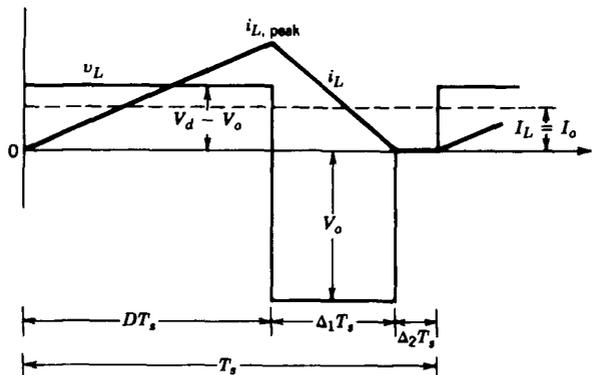
$$\frac{V_d t_{on} + 0 \cdot t_{off}}{T_s} = V_o \quad (15)$$

$$P_d = P_o \quad (16)$$

$$V_d I_d = V_o V_o \quad (17)$$

$$\frac{I_o}{I_d} = \frac{V_d}{V_o} = \frac{1}{D} \quad (18)$$

2.2.2.2 Waktu Kondisi Diskontinyu



Gambar 2. 6 Diagram operasi *buck converter* dalam mode konduksi diskontinyu

Persamaan tegangan output

$$(V_d - V_o)DT_s + (-V_o)\Delta_1 T_s = 0 \quad (19)$$

sehingga

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{D}{D + \Delta_1} \quad (20)$$

$$D = \frac{V_o \Delta_1}{V_d - V_o} \quad (21)$$

Arus puncak induktor

$$i_{L,\text{peak}} = \frac{V_o}{L} \cdot \Delta_1 T_s \quad (22)$$

Arus output rata-rata:

$$I_o = i_{L,\text{peak}} \cdot \frac{D + \Delta_1}{2} \quad (23)$$

Turunan

$$I_o = \frac{V_o T_s}{2L} (D + \Delta_1) \Delta_1 \quad (24)$$

$$I_o = \frac{V_d T_s}{2L} D \Delta_1 \quad (25)$$

$$I_o = 4I_{LB,\text{max}} D \Delta_1 \quad (26)$$

Nilai Δ_1

$$\Delta_1 = \frac{I_o}{4I_{LB,\text{max}} D} \quad (27)$$

Rasio tegangan output terhadap input (D)

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{D^2}{D^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{I_o}{I_{LB,\text{max}}} \right)} \quad (28)$$

Operasi Diskontinyu dengan Tegangan Output Konstan

Arus batas pada akhir mode kontinyu:

$$I_{LB} = \frac{T_s V_o}{2L} (1 - D) \quad (29)$$

$$D = 1 - \frac{2LI_{LB}}{T_s V_o} \quad (30)$$

Nilai maksimum ILB:

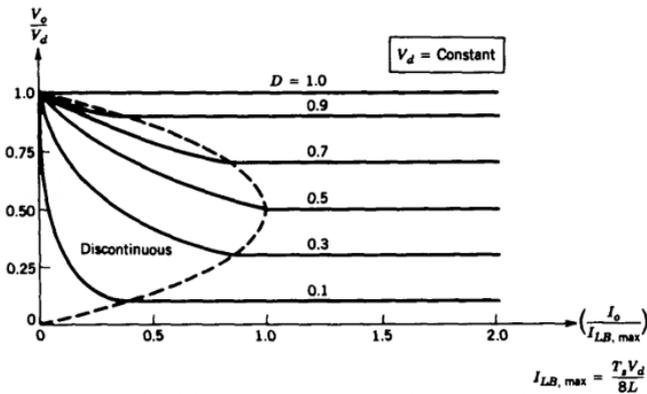
$$I_{LB,max} = \frac{T_s V_o}{2L} \quad (31)$$

Persamaan Arus Rata-Rata Induktor dalam DCM
(Mode Kondisi Diskontinyu)

$$I_{LB} = \frac{T_s V_o}{2L} (1 - D) \quad (32)$$

Nilai Maksimum Arus Rata-Rata Induktor Jika V_o dijaga konstan, maka nilai maksimum ILB terjadi saat $D=0$ atau $D=0$, yaitu:

$$I_{LB,max} = \frac{T_s V_o}{2L} \quad (33)$$



Gambar 2. 7 Karakteristik buck converter menjaga V_d tetap konstan

Berdasarkan Persamaan (32) dan (33), hubungan arus dengan duty cycle adalah:

$$I_{LB} = (1 - D)I_{LB,max} \quad (34)$$

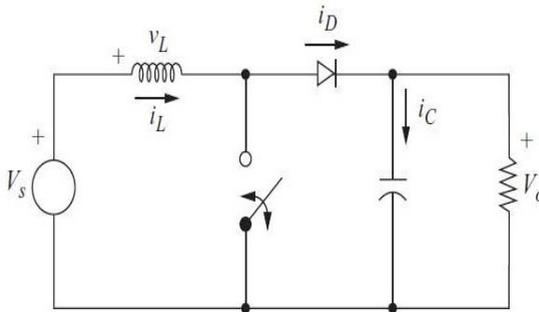
Persamaan Duty Cycle terhadap Arus Output dan Tegangan

Untuk operasi konverter saat V_o dijaga konstan, rasio duty cycle D sebagai fungsi dari $\frac{I_o}{I_{LB,max}}$ diperoleh dari:

$$D = \frac{V_o}{V_d} \left(\frac{I_o}{I_{LB,max}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{V_o}{V_d}} \right)^{1/2} \quad (35)$$

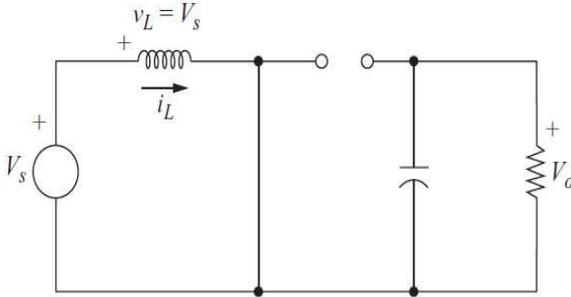
2.2.3 Konverter Penaik Tegangan

Boost Converter adalah *step up* konverter atau konverter DC-DC dengan tegangan output yang lebih besar dari tegangan input ($V_o > V_s$). Prinsip kerjanya adalah menaikkan tegangan DC dengan mengatur besar *duty cycle switching*. Rangkaian *Boost converter* pada gambar 2.8 terdiri dari tegangan *input* (V_s), saklar aktif (MOSFET), dioda, induktor, kapasitor, dan resistor.



Gambar 2. 8 Rangkaian boost converter

Prinsip kerja pada boost converter memiliki 2 kondisi yaitu pada saat saklar dalam kondisi “ON” seperti pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Rangkaian *boost converter* saklar “ON”

Ketika saklar dalam kondisi “ON” dioda bekerja *reversed*, sehingga output *open*/terisolasi. dan inputan menyuplai energi ke induktor. Rumus matematikanya sebagai berikut:

$$V_L = V_s \quad (36)$$

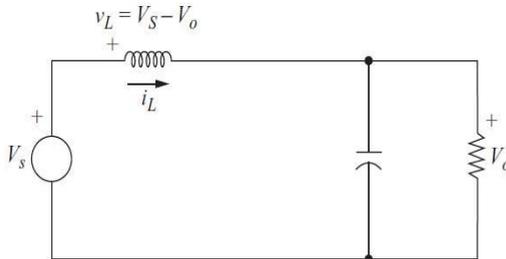
$$V_L(t) = L \frac{di}{dt} \quad (37)$$

$$V_s = L \frac{\Delta i_L(\text{on})}{dt} \quad (38)$$

$$V_s = L \frac{\Delta i_L(\text{off})}{dt} \quad (39)$$

$$\Delta i_L(\text{on}) = \frac{V_s DT}{L} \quad (40)$$

Pada kondisi 2 yaitu saat saklar dalam kondisi “OFF” dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2. 10 Rangkaian *boost converter* saklar “OFF”

Ketika saklar dalam kondisi “OFF” output menerima energi dari input dan induktor sehingga outputnya lebih besar daripada inputan. Rumus matematikanya sebagai berikut:

$$VL = V_S - V_O \quad (41)$$

$$V_L(t) = L \frac{di}{dt} \quad (42)$$

$$V_S = \frac{\Delta i_L(\text{off})}{C_{\text{off}}} \cdot V_O \quad (43)$$

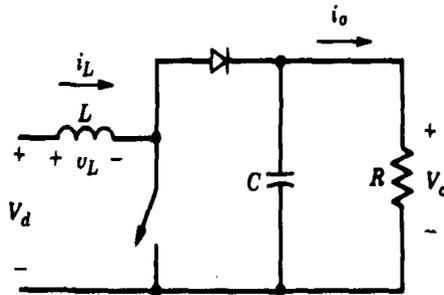
$$V_S = \frac{\Delta i_L(\text{off})}{(1-D)T} = V_O \quad (44)$$

$$\Delta i_L(\text{off}) = \frac{(V_S - V_O)(1-D)T}{L} \quad (45)$$

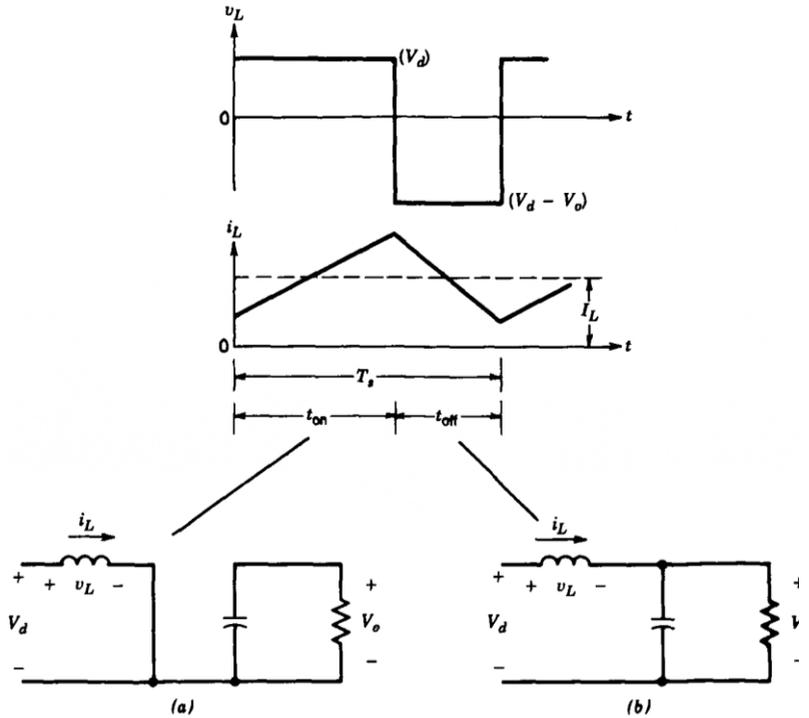
2.2.3.1 Waktu Kondisi Kontinyu

Persamaan tegangan rata-rata induktor (*steady-state boost converter*):

$$V_d t_{\text{on}} + (V_d - V_O) t_{\text{off}} = 0 \quad (46)$$



Gambar 2. 11 Rangkaian boost konverter



Gambar 2. 12 Keadaan rangkaian boost converter (dengan asumsi i mengalir kontinu): (a) menyala; (b) mati.

Rasio tegangan output terhadap input setelah disusun ulang:

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1-D} \quad (47)$$

$$D = 1 - \frac{V_d}{V_o} \quad (48)$$

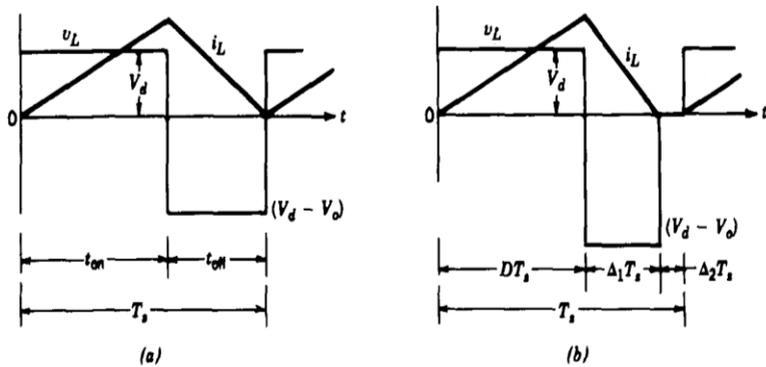
Asumsi rangkaian tanpa rugi:

$$P_d = P_o \Rightarrow V_d I_d = V_o I_o \quad (49)$$

Rasio arus output terhadap input:

$$\frac{I_o}{I_d} = 1 - D \quad (50)$$

2.2.3.2 Waktu Kondisi Diskontinyu



Gambar 2. 13 Rangkaian *boost converter* saklar “OFF”

Tegangan output terhadap tegangan input:

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{\Delta_1 + D}{\Delta_1} \quad (51)$$

Hubungan antara arus output dan input:

$$\frac{I_o}{I_d} = \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + D} \quad (\text{karena } P_d = P_o) \quad (52)$$

Arus input rata-rata:

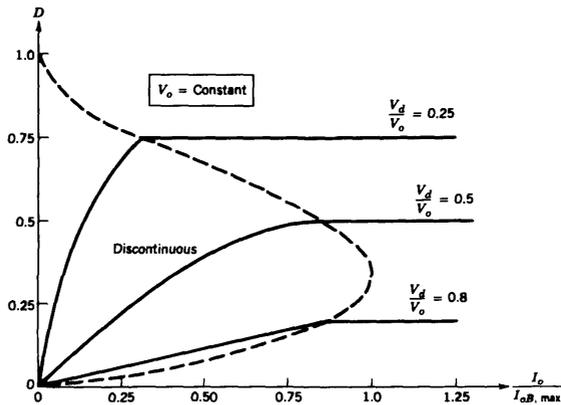
$$I_d = \frac{V_d}{2L} \cdot T_s (D + \Delta_1) \quad (53)$$

Arus output rata-rata:

$$I_o = \left(\frac{T_s V_d}{2L} \right) D \Delta_1 \quad (54)$$

Duty cycle dalam fungsi arus output maksimum:

$$D = \left[\frac{4}{27} \cdot \frac{V_o}{V_d} \left(\frac{V_o}{V_d} - 1 \right) \cdot \frac{I_o}{I_{oB,\max}} \right]^{1/2} \quad (55)$$



Gambar 2. 14 Karakteristik *boost converter* menjaga V_d tetap konstan

Rumus Arus Maksimum dalam Discontinuous Mode

$$I_{oB,\max} = 0.074 \cdot \frac{T_s V_o}{L} \quad (55)$$

Energi yang Ditransfer ke Output dalam Discontinuous Mode

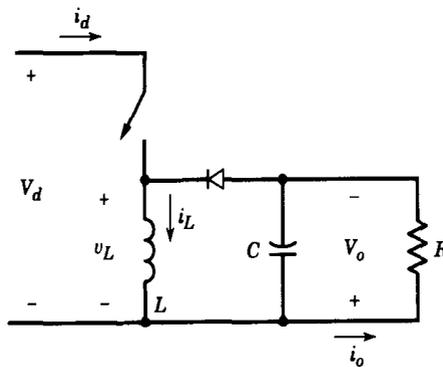
$$\frac{L}{2} i_{L,\text{peak}}^2 = \frac{(V_d D T_s)^2}{2L} \quad (56)$$

2.2.4 Konverter Penurun-Penaik Tegangan

Aplikasi utama dari konverter step-down/step-up atau buck–boost adalah pada catu daya DC teratur, di mana keluaran dengan polaritas negatif mungkin diinginkan terhadap terminal umum dari tegangan masukan, dan tegangan keluarannya bisa lebih tinggi atau lebih rendah dari tegangan masukannya.

Sebuah konverter buck–boost dapat diperoleh dari hubungan rangkaian dua konverter dasar secara kaskade: konverter step-down (buck) dan konverter step-up (boost). Dalam keadaan tunak, rasio konversi tegangan keluaran terhadap tegangan masukan adalah hasil kali dari rasio konversi kedua konverter tersebut (dengan asumsi kedua saklar memiliki rasio kerja D yang sama):

$$V_{out} = \frac{D}{1-D} \cdot V_{in} \quad (57)$$



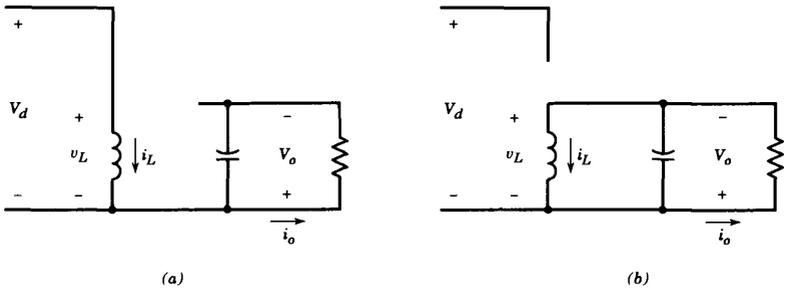
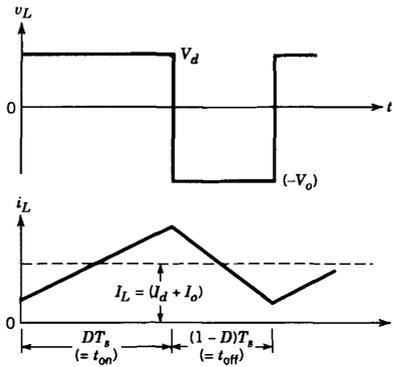
Gambar 2. 15 *Buck - Boost Converter*

2.2.4.1 Mode Konduksi Kontinu (CCM)

Dengan menyetarakan integral tegangan induktor selama satu periode:

$$V_d DT_s + (-V_o)(1 - D)T_s = 0$$

$$\therefore \frac{V_o}{V_d} = \frac{D}{1-D} \tag{58}$$



Gambar 2. 16 Converter buck-boost ($i_L > 0$) ; (a) saklar hidup dan (b) saklar mati

$$\frac{I_o}{I_d} = \frac{1-D}{D} \quad (\text{assuming } P_d = P_o) \quad (59)$$

Persamaan 55 menyatakan bahwa, tergantung pada rasio duty cycle, tegangan keluaran bisa lebih besar atau lebih kecil daripada tegangan masukan.

2.2.4.2 Batas Antara Konduksi Continu dan Discontinue

Gambar 2.17 menunjukkan bentuk gelombang pada batas konduksi kontinu. Berdasarkan definisi, arus induktor i_{Li_LiL} bernilai nol pada akhir interval *off*.

$$I_{LB} = \frac{1}{2} i_{L,\text{peak}} \quad (60)$$

$$I_{LB} = \frac{T_s V_d}{2L} D \quad (61)$$

Dari Gambar 7-18

$$I_o = I_L - I_d \quad (62)$$

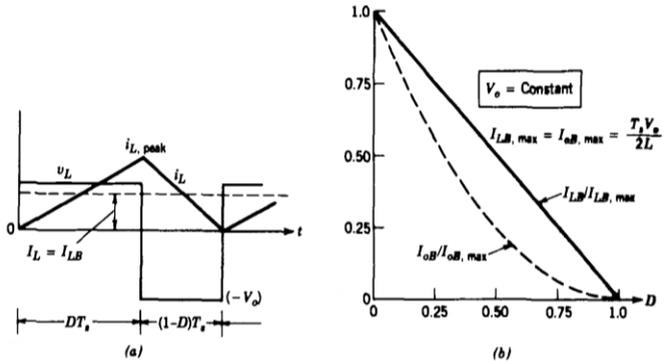
(karena arus rata-rata kapasitor sama dengan nol).

Dengan menggunakan Pers. 59 sampai 62, kita dapat memperoleh arus rata-rata induktor dan arus keluaran pada batas konduksi kontinu dalam bentuk V_o .

$$I_{LB} = \frac{T_s V_o}{2L} (1 - D) \quad (63)$$

dan

$$I_{oB} = \frac{T_s V_o}{2L} (1 - D)^2 \quad (64)$$



Gambar 2. 17 Konverter buck-boost batas konduksi kontinu dan discontinue

$$I_{LB,max} = \frac{T_s V_o}{2L} \quad (65)$$

$$I_{oB,max} = \frac{T_s V_o}{2L} \quad (66)$$

$$I_{LB} = I_{LB,max} (1 - D) \quad (67)$$

$$I_{oB} = I_{oB,max} (1 - D)^2 \quad (68)$$

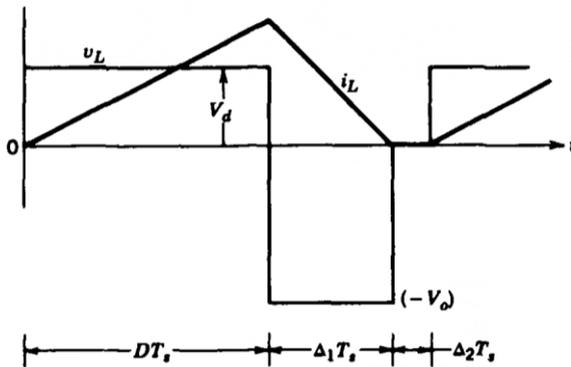
2.2.4.3 Mode Konduksi Tidak Kontinu (DCM)

Gambar 2.18 menunjukkan gelombang dengan arus induktor i_{L_i} yang tidak kontinu. Jika kita menyamakan integral tegangan induktor selama satu periode menjadi nol,

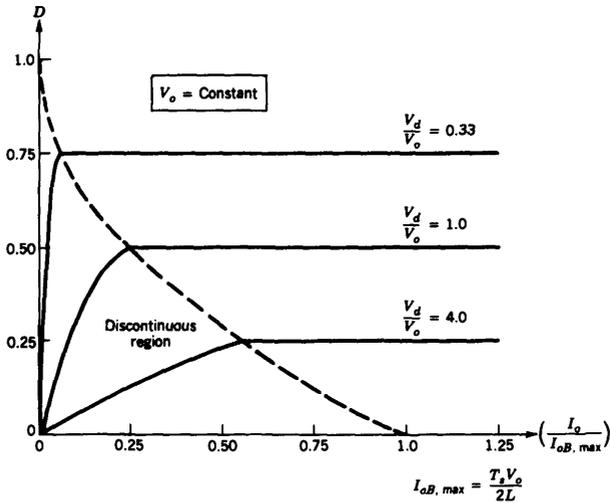
$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{D}{\Delta_1} \quad (69)$$

$$\frac{I_o}{I_d} = \frac{\Delta_1}{D} \quad (P_d = P_o) \quad (70)$$

$$I_L = \frac{V_d}{2L} DT_s (D + \Delta_1) \quad (71)$$



Gambar 2. 18 Gelombang konverter buck-boost kondisi discontinuous-conduction mode.



Gambar 2. 19 Karakteristik *buck-boost converter* dengan V_o konstan.

Maka berguna untuk memperoleh D sebagai fungsi dari arus beban keluaran I_o , untuk berbagai nilai V_d/V_o . Menggunakan persamaan yang diturunkan sebelumnya, diperoleh:

$$D = \frac{V_o}{V_d} \sqrt{\frac{I_o}{I_{oB,max}}} \quad (72)$$

Gambar 2.19 menunjukkan plot D sebagai fungsi dari $I_o/I_{oB,max}$ untuk berbagai nilai V_d/V_o .

Batas antara mode konduksi kontinu dan diskontinu ditunjukkan dengan kurva garis putus-putus.

2.2.4 Simulink MATLAB

Simulink, sebagai bagian dari MATLAB, menyediakan lingkungan pemodelan berbasis blok yang sangat berguna untuk menganalisis sistem dinamis, termasuk sistem elektronik daya seperti konverter DC-DC. Dalam penelitian ini, Simulink digunakan untuk merancang dan mensimulasikan performa konverter DC-DC dua arah antara tegangan 72V dan 12V yang digunakan dalam sistem penyimpanan energi kendaraan hasil konversi.

Simulasi ini memungkinkan analisis tegangan, arus, efisiensi, serta respons sistem terhadap perubahan beban dan gangguan, tanpa harus langsung membangun perangkat keras. Toolbox yang tersedia, termasuk blok matematika dan kontrol, mendukung pengujian skema kontrol seperti Voltage Mode Control (VMC) dan Average Current Mode Control (ACMC). Dengan demikian, Simulink menjadi alat penting untuk menguji kestabilan dan keandalan desain, serta mengoptimalkan sistem sebelum implementasi fisik.