

# 2

## PENUKAR DC-DC

Di akhir unit ini para pelajar harus boleh:

1. Menerangkan perbezaan antara pengatur linear dengan pengatur pensuisan.
2. Menerangkan perbezaan antara ragam pengaliran berterusan dengan ragam pengaliran tak berterusan.
3. Menerangkan kendalian litar penukar asas iaitu buck, boost dan buck-boost dalam ragam pengaliran berterusan.
4. Melakarkan dan melabelkan gelombang-gelombang penting bagi penukar asas.
5. Menerbitkan persamaan-persamaan yang diperlukan dalam analisis penukar dc-dc berasaskan lakaran gelombang.
6. Mereka bentuk penukar asas berasaskan spesifikasi yang diberikan.

### 2-1 Pengenalan

Penukar dc-dc adalah litar elektronik kuasa yang menukarkan satu aras voltan dc kepada satu aras voltan dc yang lain, biasanya dengan keluaran yang teratur. Penukar dc-dc digunakan secara meluas dalam bekalan kuasa ragam pensuisan – seperti yang terdapat dalam komputer, penerima tv dan pengecas bateri – dan pemacuan motor dc.

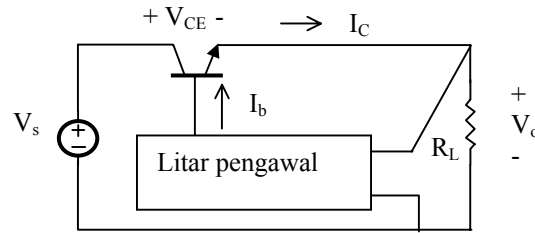
Dua penukar dc-dc yang asas adalah penukar langkah-naik dan penukar langkah-turun, masing-masing dikenali sebagai penukar buck dan penukar boost. Penukar buck-boost pula boleh menaikkan dan menurunkan voltan, bagaimanapun keutuban voltan keluarannya adalah berlawanan daripada voltan masukan. Unit ini akan menerangkan prinsip asas, kendalian, analisis dan rekabentuk bagi penukar dc-dc.

### 2-2 Pengatur Linear

Sebelum kita membincangkan lebih lanjut tentang penukar ragam pensuisan, adalah berfaedah sekiranya kita membincangkan terlebih dahulu tentang pengatur linear. Satu cara untuk menukarkan satu voltan dc kepada satu voltan dc yang lebih rendah adalah dengan menggunakan litar dalam Rajah 2-1. Voltan keluaran dc diberi oleh persamaan

$$V_o = I_L R_L$$

dengan arus beban dikawal oleh transistor. Dengan mengawal arus tapak transistor,  $I_B$ , voltan keluaran boleh dikawal daripada julat 0 kepada  $V_s$ . Arus tapak boleh dilaras untuk memampas perubahan dalam voltan masukan atau beban, dengan itu voltan keluaran dapat diatur. Litar seperti ini dikenali sebagai penukar dc-dc linear atau pengatur linear kerana transistor beroperasi dalam kawasan linear, bukannya dalam kawasan ketepuan atau kepotongan. Sebenarnya, dalam kes ini, transistor bertindak sebagai rintangan boleh ubah yang berubah mengikut perubahan arus tapak transistor,  $I_B$ .



**Rajah 2-1** Pengatur linear asas

Biarapun kaedah ini merupakan kaedah mudah untuk menukarkan satu voltan dc kepada satu voltan dc yang lebih rendah, namun kecekapan yang rendah adalah penghalang utama untuk penggunaan litar seperti ini pada kuasa tinggi. Bagi litar ini, kuasa yang diserap oleh beban adalah  $V_o I_L$ , dan kuasa yang diserap oleh transistor  $V_{CE} I_L$ , dengan mengangap arus tapak adalah kecil. Kuasa yang hilang dalam transistor adalah besar, menjadikan litar ini tidak cekap. Sebagai contoh, sekiranya voltan keluaran seperempat daripada voltan masukan, beban rintangan menyerap seperempat daripada kuasa masukan, dengan itu kecekapan litar hanyalah 25%. Transistor pula menyerap 75% daripada kuasa masukan. Kecekapan akan bertambah buruk lagi untuk keluaran yang lebih rendah. Di samping kecekapan yang rendah, pengatur linear juga tidak boleh menghasilkan voltan keluaran yang lebih tinggi daripada voltan masukan.

### Contoh 2-2-1 Pengatur linear

Sebuah pengatur linear menghasilkan voltan keluaran teratur 5V. Kuasa keluaran pengatur adalah 5W. Kira nilai  $V_{CE}$ , lesapan kuasa dalam transistor, kuasa masukan dan kecekapan pengatur pada nilai voltan masukan: 8V, 10V, 15 V dan 20V. Anggap nilai arus tapak transistor,  $I_B$ , adalah kecil dengan itu  $I_C \cong I_E$ .

**Penyelesaian** Diberi voltan keluaran bernilai 5V dan kuasa keluaran 5W. Oleh itu arus keluaran

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} = \frac{5W}{5V} = 1A$$

Dengan menganggap arus tapak transistor adalah kecil, arus masukan,  $I_s$ , sama dengan arus keluaran pengatur,  $I_o$ .

Kuasa masukan,  $P_{in} = V_s \times I_s$ , dan kuasa keluaran,  $P_o = V_o \times I_o$ .

$$\text{Kecekapan, } \eta = \frac{P_o}{P_{in}}$$

$$V_{CE} = V_s - V_o$$

Kehilangan dalam transistor,  $P_T = V_{CE} \times I_C = V_{CE} \times I_o$

Keputusan pengiraan berdasarkan persamaan-persamaan di atas diringkaskan ke dalam **Jadual 2-2-1**.

**Jadual 2-2-1** Taburan keputusan untuk Contoh 2-2-1

$V_s$	$V_{CE}$	$V_o$	$P_{in}$	$P_T$	$P_o$	$\eta$
8V	3V	5V	8W	3W	5W	62.50%
10V	5V	5V	10W	5W	5W	50.00%
15V	10V	5V	15W	10W	5W	33.33%
20V	15V	5V	20W	15W	5W	25.00%

Perhatikan bahawa kecekapan litar semakin berkurangan apabila voltan masukan semakin bertambah.

## 2-2 Asas Penukar Pensuisan

Dalam penukar pensuisan, transistor berkendali sebagai suis elektronik; suis boleh berada sama ada dalam keadaan on atau off sepenuhnya. Litar seperti ini — pada masa dahulu, iaitu pada masa SCR digunakan dengan meluas dalam litar elektronik kuasa — dikenali sebagai pemenggal.

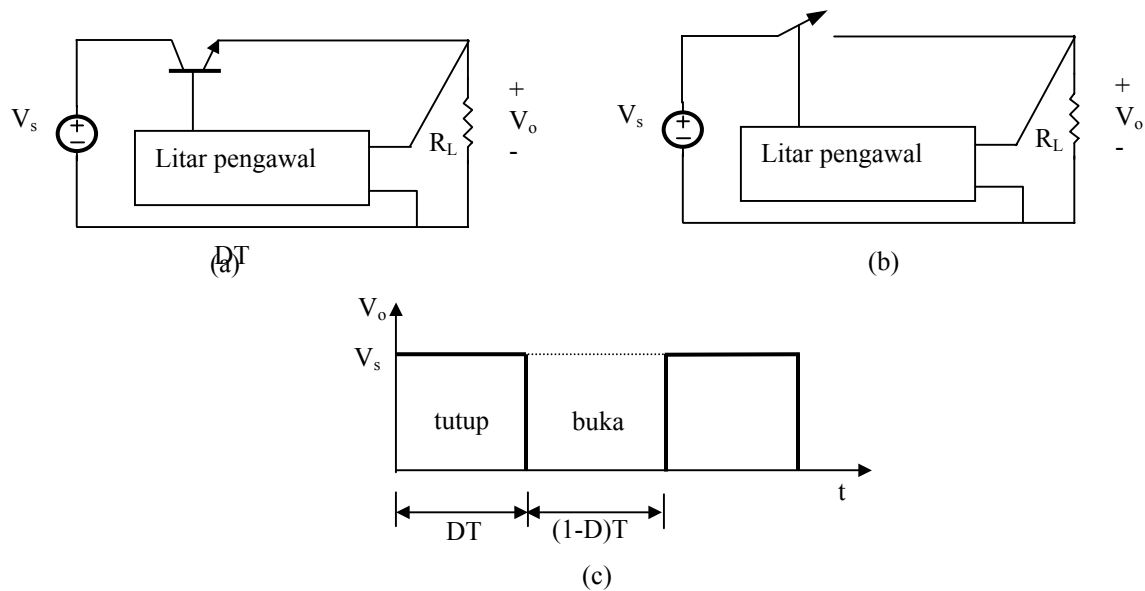
Anggap suis dalam Rajah 2-2 adalah unggul; voltan keluaran adalah sama dengan voltan masukan apabila suis dalam keadaan tertutup, dan voltan keluaran adalah sifar apabila suis dalam keadaan buka. Penutupan dan pembukaan suis secara berkala seperti ini akan menghasilkan voltan keluaran berdenyut seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2-2c. Nilai purata atau komponen dc bagi voltan keluaran adalah

$$V_o = \frac{1}{T_s} \int_0^T v_o(t) dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{DT} V_s dt = V_s D \quad (2-1)$$

Komponen dc bagi voltan keluaran boleh dikawal dengan melaraskan kitar tugas  $D$ , yang merupakan pecahan masa tutup suis berbanding dengan tempoh pensuisan:

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} \quad (2-2)$$

Komponen dc bagi voltan keluaran yang boleh dihasilkan oleh litar ini adalah sama atau lebih kecil daripada voltan masukan.



**Rajah 2-2** (a) pengatur pensuisan asas (b) litar setara pensuisan (c) voltan keluaran

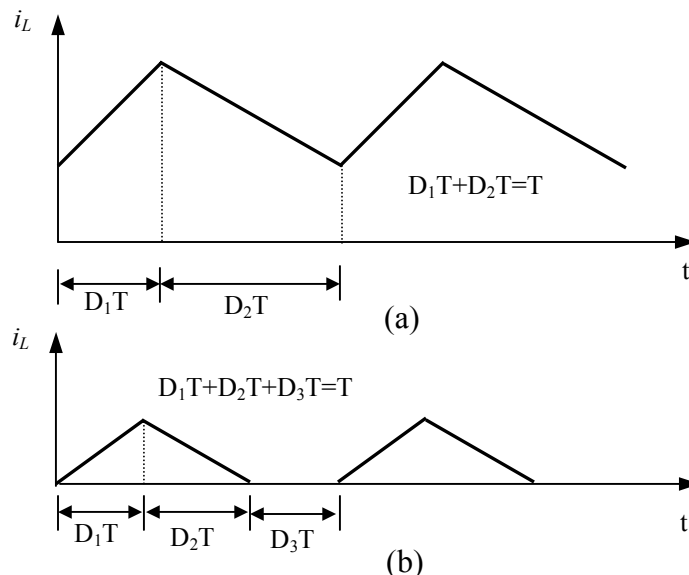
Kuasa yang diserap oleh suis unggul adalah sifar. Apabila suis terbuka, tiada arus yang mengalir melaluinya; apabila suis tertutup, tiada voltan yang merintanginya. Oleh itu, semua kuasa diserap oleh beban, dan kecekapan adalah 100%. Kehilangan kuasa boleh berlaku dalam suis sebenar kerana voltan merintanginya tidak sama dengan sifar apabila suis on, dan suis mesti melalui kawasan linear semasa peralihan keadaan iaitu daripada keadaan on kepada keadaan off atau sebaliknya. Kecekapan litar penukar praktik adalah dalam julat 75% hingga 95%. Walau bagaimanapun kita hanya akan membincangkan pengatur pensuisan yang unggul bagi memudahkan analisis yang kita akan lakukan.

## 2-3 Penukar Buck

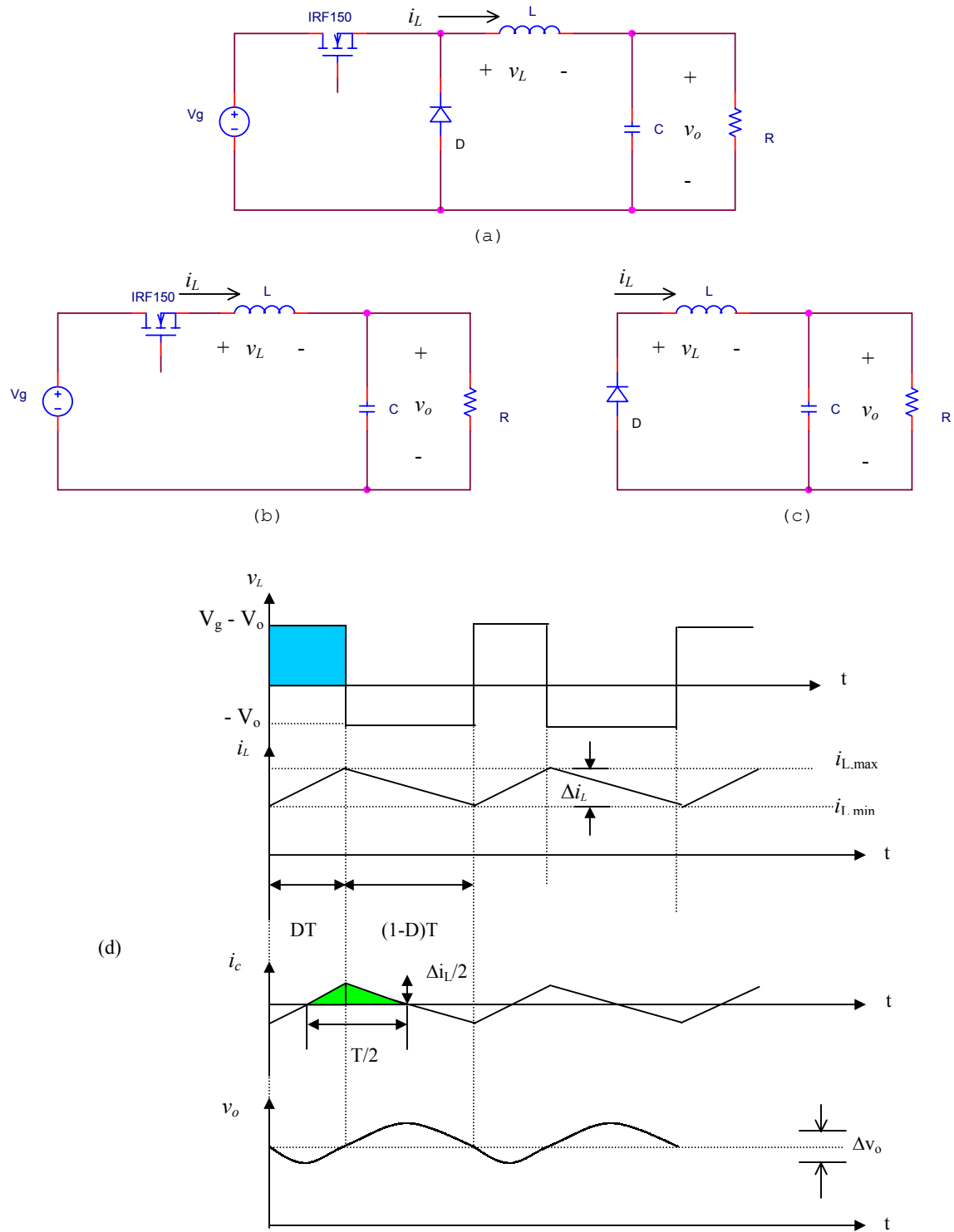
**Kendalian penukar buck.** Penukar buck adalah penukar langkah turun yang menghasilkan voltan keluaran lebih rendah daripada atau sama dengan voltan masukannya. Dari segi konsep, litar mudah dalam Rajah 2-2 bolehlah dianggap sebagai penukar buck. Bagaimanapun, voltan keluaran yang dihasilkan oleh litar ini adalah voltan keluaran berdenyut, memadai untuk sesetengah penggunaan. Namun begitu, kebanyakan penggunaan memerlukan voltan keluaran dc yang lebih tulen.

Satu cara untuk mendapatkan voltan keluaran dc yang lebih tulen adalah dengan menyisipkan *penapis lulus rendah LC* kepada penukar asas berkenaan, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2-3. Pemuat, C, bertindak untuk mengurangkan kandungan riak voltan yang merintanginya, sementara pearuh, L, pula bertindak untuk melicinkan arus yang melaluinya. Dari segi fungsi bolehlah dikatakan bahawa penapis LC bertindak untuk melakukan pemurataan terhadap voltan keluaran berdenyut; dan ini menghasilkan voltan purata pada keluaran penapis. Diod pula menyediakan laluan bagi arus pearuh apabila suis dibuka (off), dan ia mengalami pincang balikan apabila suis ditutup (on).

Semasa suis on, diod pincang balikan dan tenaga dari masukan dihantar ke pearuh dan beban. Semasa suis off, arus pearuh akan mengalir menerusi diod, memindahkan sebahagian tenaga yang tersimpan ke beban. Sekiranya arus pearuh tidak jatuh ke sifar semasa suis off (diod on), arus pearuh dikatakan berterusan dan ini menghasilkan *ragam pengaliran berterusan*, Rajah 2-4(a). Sekiranya arus pearuh jatuh ke sifar untuk beberapa ketika dalam satu kitar, arus pearuh dikatakan tak berterusan dan ini menghasilkan *ragam pengaliran tak berterusan*, Rajah 2-4(b). Analisis yang kita akan lakukan dalam unit ini terhad kepada ragam pengaliran berterusan sahaja.



**Rajah 2-3** Arus pearuh menentukan ragam kendalian bagi penukar dc-dc, (a) Ragam pengaliran berterusan, (b) Ragam pengaliran tak berterusan



**Rajah 2-4** (a) litar penukar buck (b) litar semasa suis on (c) litar semasa suis off (d) gelombang-gelombang penting untuk kegunaan analisis.

### 2-3-1 Analisis litar penukar buck.

Analisis untuk penukar buck berasaskan kepada anggapan berikut:

1. Kendalian litar dalam keadaan mantap.
2. Arus pearuh berterusan (ragam pengaliran berterusan).
3. Pemuat adalah amat besar sehingga voltan keluaran boleh dianggap malar pada nilai  $V_o$ . Ini adalah anggapan tertib pertama; anggapan tertib kedua pula akan mempertimbangkan nilai terhingga bagi pemuat bagi menilai riak pada voltan keluaran.
4. Tempoh pensuisan adalah  $T$ ; suis berkeadaan tutup untuk selang masa  $DT$  dan berkeadaan buka untuk selang masa  $(1-D)T$ .
5. Semua komponen litar adalah unggul.

**Mendapatkan hubungan purata antara voltan keluaran dengan voltan masukan,  $V_o/V_g$ .** Dalam keadaan mantap, gelombang  $v_L$  akan berulang dari satu kitar ke kitar yang berikutnya. Oleh itu, kamiran voltan  $v_L$  terhadap masa bagi selang masa  $T$  adalah bersamaan dengan sifar. Berasaskan prinsip ini, kita akan memperolehi hubungan antara voltan keluaran purata dengan voltan masukan.

$$\begin{aligned}\int_0^T v_L dt &= \int_0^{t_{on}} v_L dt + \int_0^{t_{off}} v_L dt = 0 \\ (V_s - V_o)DT + V_o(1-D)T &= 0 \\ V_o &= DV_g\end{aligned}\tag{2-3a}$$

atau

$$\frac{V_o}{V_g} = D\tag{2-3b}$$

Untuk litar penukar buck dalam ragam pengaliran berterusan, kita dapati bahawa voltan keluaran berubah secara linear dengan kitar tugas suis untuk suatu nilai voltan masukan. Ia tidak bergantung kepada parameter litar yang lain. Persamaan ini, sebenarnya, mencirikan penukar buck dalam ragam pengaliran berterusan.

**Mendapatkan persamaan riak arus pearuh,  $\Delta i_L$ .** Riak puncak ke puncak bagi arus pearuh boleh diperolehi melalui hubungan

$$\begin{aligned}
\Delta i_L &= \frac{1}{L} \int_0^{DT} v_L dt \\
&= \frac{1}{L} [\text{luas di bawah graf } v_L] \\
&= \frac{1}{L} (V_s - V_o) DT \\
&= \frac{1}{L} \frac{V_s (1-D) D}{f}
\end{aligned} \tag{2-4a}$$

atau

$$\Delta i_L = \frac{1}{L} \frac{V_o (1-D)}{f} \tag{2-4b}$$

Daripada  $\Delta i_L$  kita boleh mendapatkan arus peraruh minimum,  $i_{L,\min}$  dan arus pearuh maksimum,  $i_{L,\max}$ .

$$i_{L,\min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} \tag{2-5a}$$

$$i_{L,\max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \tag{2-5b}$$

Bagi litar buck, arus pearuh purata sama dengan arus beban berasaskan anggapan semua komponen dc bagi arus pearuh mengalir melalui beban, dengan ini

$$I_L = I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{DV_g}{R} \tag{2-6}$$

**Mendapatkan riak voltan keluaran,  $\Delta v_o$**  Riak voltan keluaran boleh dianggarkan berasaskan gelombang arus pemuat  $i_c$ . Anggaran ini tampak bercanggah dengan anggaran terdahulu yang menyatakan voltan keluaran adalah malar kerana  $C$  yang besar, dengan itu voltan keluaran tidak mengandungi riak; dan sekarang, secara tiba-tiba voltan keluaran mengandungi riak pula. Sebenarnya apa yang berlaku adalah, kita menggunakan keputusan daripada anggaran pertama, iaitu  $i_c$ , untuk menganggarkan riak pada voltan keluaran, yang pada anggaran pertama sememangnya bernilai sifar. Oleh kerana riak voltan keluaran diperolehi berdasarkan keputusan anggaran pertama (**anggaran tertib pertama**), maka riak voltan keluaran adalah satu parameter hasil daripada **anggaran tertib kedua**.

Arus pemuat,  $i_c$ , boleh diperolehi dengan membuat anggapan bahawa semua komponen riak  $i_L$  mengalir melalui  $i_c$ , dan semua komponen dc pula mengalir melalui beban. Daripada arus pemuat  $i_c$ , diperolehi

$$\begin{aligned}
\Delta v_o &= \Delta v_c = \frac{1}{C} \int i_c dt \\
&= \frac{1}{L} [\text{luas di bawah graf } i_c \text{ (kawasan gelap)}] \\
&= \frac{1}{C} \times \frac{1}{2} \times \frac{T}{2} \times \frac{\Delta i_L}{2} \\
&= \frac{\Delta i_L}{8fC}
\end{aligned} \tag{2-7}$$

Nilai  $\Delta i_L$  adalah sebagaimana yang diperolehi sebelum ini.

**Mendapatkan hubungan antara arus masukan dengan arus keluaran.** Dengan menganggap litar tanpa kehilangan, kuasa masukan  $P_g$  sama dengan kuasa keluaran  $P_o$ ,

$$P_g = P_o$$

Oleh itu,

$$V_g I_g = V_o I_o$$

dan

$$\frac{I_o}{I_g} = \frac{V_g}{V_o} = \frac{1}{D} \tag{2-8}$$

Oleh itu, dalam ragam pengaliran berterusan, penukar buck adalah setara dengan pengubah dc dengan nisbah lilitan pengubah dc ini boleh dikawal secara elektronik dalam julat 0 – 1 dengan mengawal kitar tugas suis.

### Contoh 2-3-1-1 Penukar Buck (analisis)

Penukar buck mempunyai parameter seperti berikut:

$$V_g = 50V$$

$$D = 0.4$$

$$L = 400 \mu\text{H}$$

$$C = 100 \mu\text{F}$$

$$f = 20 \text{ kHz}$$

$$R = 20 \Omega$$

Anggap komponen litar adalah unggul dan  $C$  adalah amat besar, kira (a) voltan keluaran  $V_o$ , (b) nilai pearuh minimum dan maksimum, dan (c) riak voltan keluaran. Lakarkan gelombang yang berkaitan dan labelkan. Kendalian dalam ragam pengaliran berterusan.

**Penyelesaian** (a) voltan keluaran purata diperoleh daripada persamaan (2-3a)

$$V_o = DV_g = (0.4)(50) = 20V$$

(b) riak arus pearuh diperoleh dengan menggunakan persamaan (2-4a)

$$\begin{aligned}\Delta i_L &= \frac{1}{L} \frac{V_g(1-D)D}{f} \\ &= \frac{1}{400 \times 10^{-6}} \frac{50(1-0.4)0.4}{20 \times 10^3} = \frac{1.5}{2} = 0.75A\end{aligned}$$

Arus pearuh purata diperoleh melalui persamaan (2-6)

$$I_L = I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{20}{20} = 1A$$

Arus pearuh minimum dan maksimum diperoleh melalui persamaan (2-5a) dan (2-5b)

$$\begin{aligned}i_{L,\min} &= I_L - \frac{\Delta i_L}{2} \\ &= 1 - \frac{1.5}{2} = 0.25A \\ i_{L,\max} &= I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \\ &= 1 + \frac{1.5}{2} = 1.75A\end{aligned}$$

Perhatikan bahawa arus pearuh minimum adalah positif, ini mengesahkan kendalian dalam ragam pengaliran berterusan.

(c) Riak voltan keluaran boleh dikira berdasarkan persamaan (2-7)

$$\Delta v_o = \frac{\Delta i_L}{8fC} = \frac{1.5}{8(20 \times 10^3)(100 \times 10^{-6})} = 0.094V$$

Perhatikan bahawa  $\Delta v_o$  adalah kecil, mengesahkan anggapan bahawa voltan keluaran malar kerana  $C$  yang besar.

### Contoh 2-3-1-2 Penukar buck (reka bentuk)

Sebuah penukar buck dikehendaki untuk menghasilkan voltan keluaran  $V_o = 5V$  daripada sebuah bateri  $V_g = 12 V$ . Rintangan setara beban  $R = 2.5 \Omega$  dan frekuensi pensuisan  $f_s = 200 \text{ kHz}$ .

- Dapatkan nilai kitar tugas,  $D$  dan arus purata pearuh,  $I_L$ .
- Kira nilai  $L$  supaya riak puncak-ke-puncak bagi arus pearuh,  $\Delta i_L$ , bersamaan dengan 20% daripada arus purata pearuh,  $I_L$ .
- Pilih  $C$  supaya riak puncak-ke-puncak voltan keluaran,  $\Delta v_o$  adalah  $0.02V$ .

Penyelesaian (a) Daripada hubungan  $\frac{V_o}{V_g} = D$

$$\therefore D = \frac{V_o}{V_g} = \frac{5}{12} = 0.417$$

$$I_L = I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{5}{2.5} = 2 A$$

(b) Diberi  $\Delta i_L$  bersamaan dengan 20% daripada arus purata pearuh.

$$\therefore \Delta i_L = 0.2 \times 2 A = 0.4 A$$

Diketahui bahawa

$$\Delta i_L = \frac{1}{L} \frac{V_o(1-D)}{f}$$

$$\therefore L = \frac{1}{\Delta i_L} \frac{V_o(1-D)}{f}$$

$$= \frac{1}{0.4} \frac{5(1-0.417)}{100 \times 10^3} = 72.9 \mu H$$

(c) Diberi  $\Delta v_o$  adalah  $0.02V$ .

$$\Delta v_o = \frac{\Delta i_L}{8fC}$$

$$\therefore C = \frac{\Delta i_L}{8f\Delta v_o} = \frac{0.4}{(8)(100 \times 10^3)(0.02)} = 200 \mu F$$

## **Glosari**

*Penukar DC-DC – DC-DC Converter*

*Chopper – Pemenggal*

*Buck Converter – Penukar buck*

*Ragam Pengaliran Berterusan – Continuous Conduction Mode (CCM)*

*Ragam Pengaliran Tak Berterusan – Discontinuous Conduction Mode (DCM)*

*Pearuh – Inductor*

*Pemuat – Capacitor*

*Penapis lulus rendah – Low pass filter*

*Riak – Ripple*

*Anggaran tertib pertama – First order approximation*

*Anggaran tertib kedua – Second order approximation*