

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA

UFMG

ELT043 - Fontes de Alimentação CC e CA

Prof. Dr. Thiago de Oliveira
Departamento de Eng. Eletrônica

gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG



gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Apresentação

- **Prof. Thiago de Oliveira**
 - Sala 2620
 - E-mail: troliveira@cpdee.ufmg.br
- **Bibliografia**
 - Notas de aula;
 - N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins. **Power Electronics: Converter, Applications and Design**. 3rd Edition, Wiley;
 - R. W. Erickson, D. Maksimovic. **Fundamental Power Electronics**. 2nd Edition, Springer;
 - Application Notes;
 - Artigos Técnicos e Científicos.

2



gpep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Apresentação

- **Distribuição de Pontos e Datas Importantes**
 - Projeto I – 40pts
 - Projeto II – 40pts
 - Prova – 20pts (12/11)

3



gpep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Apresentação

- **Objetivo da Disciplina**
 - Desenvolver habilidades de Projeto, Especificação, Modelagem e Controle de conversores estáticos CC/CC e CC/CA
- **Metodologia**
 - Aprendizado baseado em projeto:
 - Serão realizados dois projetos ao longo da disciplina:
 - Fontes Chaveadas;
 - Aplicação de Inversor;
 - As aulas servirão para fornecer a arcabouço teórico-prático necessário para o desenvolvimento dos projetos e com isso complementar as habilidades citadas acima;
 - Os trabalhos serão desenvolvidos em ambiente de simulação (LTSpice, Simulink, PSIM), mas serão abordados detalhes construtivos de um projeto real.

4



gpep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Apresentação

- **Metodologia...**
 - Os principais conteúdos abordados nas aulas serão:
 - **Discussão das especificações de projeto** – Critérios normativos, conceitos básicos, possíveis soluções topológicas, características da topologia a ser desenvolvida;
 - **Projeto e Especificação do conversor estático:**
 - Projeto Eletrônico (Potência e sinal);
 - Projeto Magnético;
 - Projeto Térmico;
 - **Técnicas de modelagem de conversores (linearização);**
 - **Técnicas de controle e projeto de controladores;**

5



gpep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Apresentação

- **Conhecimentos prévios necessários:**
 - Circuitos Elétricos;
 - Dispositivos e Circuitos Eletrônicos Básicos;
 - Sistemas Digitais;
 - Análise de Sistemas Dinâmicos Lineares;
 - Controle de Sistemas Lineares;
 - Conversão da energia (Circuitos magnéticos);
 - Eletrônica de Potência;
- **Conhecimentos desejáveis**
 - Processamento de Sinais;
 - Acionamentos Elétricos.

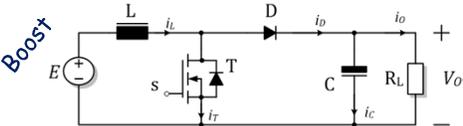
6



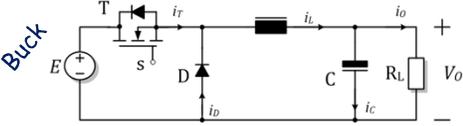
Conversores CC/CC

- Conversor Não-isolados

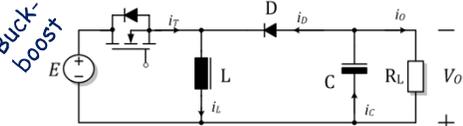
Boost



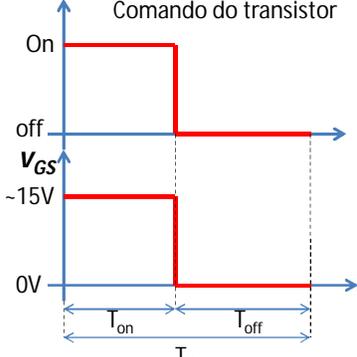
Buck



Buck-boost



Comando do transistor



Ciclo de Trabalho (Duty Cycle)

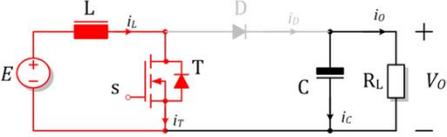
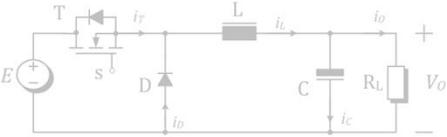
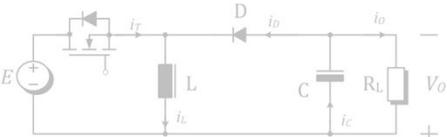
$$D = \frac{T_{on}}{T_S}$$

9

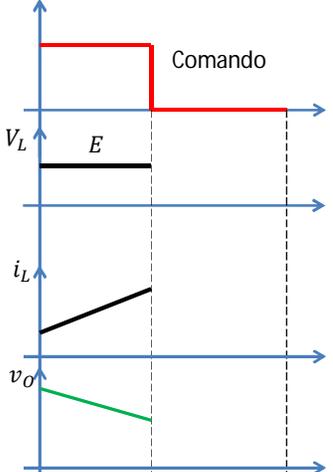


Conversores CC/CC

- Conversor Boost em CCM

Comando



10

gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Conversores CC/CC

- Conversor Boost em CCM

11

gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Conversores CC/CC

- Conversor Boost em CCM

$$ET_{on} = -(E - V_o)T_{off}$$

$$ET_{on} = -(E - V_o)(T_s - T_{on})$$

$$\div T_s \rightarrow ED = -(E - V_o)(1 - D)$$

$$V_o = \frac{E}{1 - D}$$

Para: $0 \leq t \leq T_{on}$

$$L \frac{di_L}{dt} = E \rightarrow L \frac{\Delta I_L}{T_{on}} = E$$

$$L = \frac{ED}{\Delta I_L f_s}$$

$$I_T = DI_L$$

$$I_D = I_o = (1 - D)I_L$$

12

gpep
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Conversores CC/CC

- Conversor Boost em CCM

$$V_o = \frac{E}{1-D}$$

$$L = \frac{ED}{\Delta I_L f_s}$$

$$C = \frac{I_L(1-D)D}{f_s \Delta V_o}$$

$$I_T = DI_L$$

$$I_D = I_o = (1-D)I_L$$

$$V_{Tmax} = V_o$$

$$V_{Dmax} = V_o$$

$$I_D T_{on} = C \Delta V_o$$

13

gpep
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Conversores CC/CC

- Conversor Boost em condição crítica

$$I_{Lmax} = \Delta I_L = 2I_L$$

$$L = \frac{ED}{\Delta I_L f_s}$$

$$L_{crit} = \frac{ED}{2I_L f_s}$$

$$I_{Lcrit} = \frac{ED}{2L f_s}$$

$$\frac{ED}{2L f_s} = \frac{I_o}{1-D} = \frac{V_o}{R_L(1-D)} = \frac{E}{R_L(1-D)^2}$$

$$D(1-D)^2 = \frac{2L f_s}{R_L} = K$$

14

gpep
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Conversores CC/CC

- Conversor Boost em condição crítica

- Caso $K > 0.1481$, o boost não entra em DCM

15

gpep
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Conversores CC/CC

- Conversor Boost em DCM

$$ET_{on} = -(E - V_o)(T_s - T_{on} - t_x)$$

$$V_o = \frac{E \left(1 - \frac{t_x}{T_s}\right)}{1 - D - \frac{t_x}{T_s}}$$

$$I_o = \frac{V_o}{R_L} = \frac{I_{Lmax}}{2} \left(1 - D - \frac{t_x}{T_s}\right)$$

$$I_{Lmax} = \Delta I_L = \frac{ED}{L f_s}$$

$$\frac{t_x}{T_s} = 1 - D - \frac{2L f_s}{R_L E D} V_o \rightarrow \frac{t_x}{T_s} = 1 - D - \frac{V_o}{E D} K$$

$$V_o = \frac{E}{2} \left(1 + \sqrt{1 + 4D^2/K}\right)$$

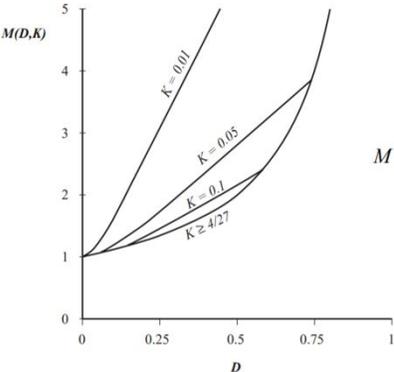
$$D = \sqrt{\frac{K V_o}{E} \left(\frac{V_o}{E} - 1\right)}$$

16 16




Conversores CC/CC

- Conversor Boost em DCM



$$M = \begin{cases} \frac{1}{1-D} & \text{for } K > K_{crit} \\ \frac{1 + \sqrt{1 + 4D^2/K}}{2} & \text{for } K < K_{crit} \end{cases}$$

Approximate M in DCM:

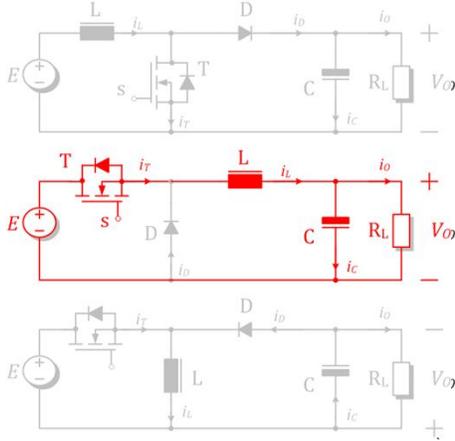
$$M \approx \frac{1}{2} + \frac{D}{\sqrt{K}}$$

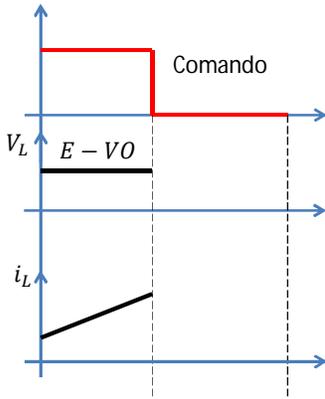
17




Conversores CC/CC

- Conversor Buck em CCM





18

gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Conversores CC/CC

- Conversor Buck em CCM

19

gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Conversores CC/CC

- Conversor Buck em CCM

$$(E - V_O)T_{on} = -(-V_O)T_{off}$$

$$V_O = ED$$

Para: $0 \leq t \leq T_{on}$

$$L \frac{di_L}{dt} = (E - V_O)$$

$$L = \frac{E(1 - D)D}{\Delta I_L f_s}$$

$$I_T = DI_L$$

$$I_D = (1 - D)I_L$$

$$I_O = I_L$$

20

gpep
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Conversores CC/CC

- Conversor Buck em CCM

$$C\Delta V_O = \frac{\Delta I_L T_s}{8}$$

$$V_O = ED$$

$$L = \frac{E(1-D)D}{\Delta I_L f_s}$$

$$C = \frac{\Delta I_L}{8f_s \Delta V_O}$$

$$I_T = DI_L$$

$$I_D = (1-D)I_L$$

$$V_{Tmax} = E$$

$$V_{Dmax} = E$$

21

gpep
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Conversores CC/CC

- Conversor Buck em condição crítica

$$I_{Lmax} = \Delta I_L = 2I_L$$

$$L = \frac{ED(1-D)}{\Delta I_L f_s}$$

$$L_{crit} = \frac{ED(1-D)}{2I_L f_s}$$

$$I_{Lcrit} = \frac{ED(1-D)}{2Lf_s}$$

$$\frac{ED(1-D)}{2Lf_s} = I_O = \frac{V_O}{R_L} = \frac{ED}{R_L}$$

$$1-D = \frac{2Lf_s}{R_L} = K$$

22

gpep
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Conversores CC/CC

- Conversor Buck em DCM

$$(E - V_o)T_{on} = -(-V_o)(T_s - T_{on} - t_x)$$

$$V_o = \frac{ED}{1 - \frac{t_x}{T_s}}$$

$$I_o = \frac{V_o}{R_L} = \frac{I_{Lmax}}{2} \left(1 - \frac{t_x}{T_s}\right)$$

$$I_{Lmax} = \Delta I_L = \frac{(E - V_o)D}{Lf_s}$$

$$\frac{t_x}{T_s} = \frac{KV_o}{D(E - V_o)}$$

$$V_o = \frac{2E}{1 + \sqrt{1 + 4K/D^2}}$$

$$D = \frac{V_o}{E} \sqrt{\frac{K}{1 - V_o/E}}$$

23

gpep
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Conversores CC/CC

- Conversor Buck em DCM

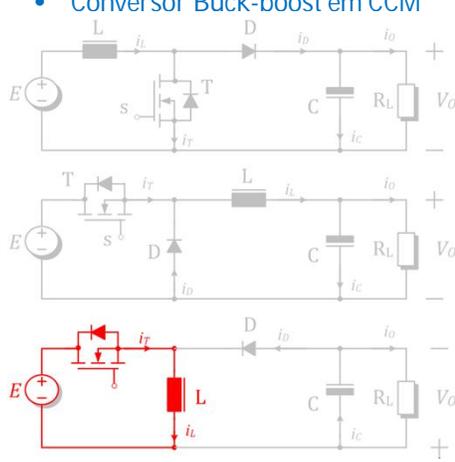
$$M = \begin{cases} D & \text{for } K > K_{crit} \\ \frac{2}{1 + \sqrt{1 + 4K/D^2}} & \text{for } K < K_{crit} \end{cases}$$

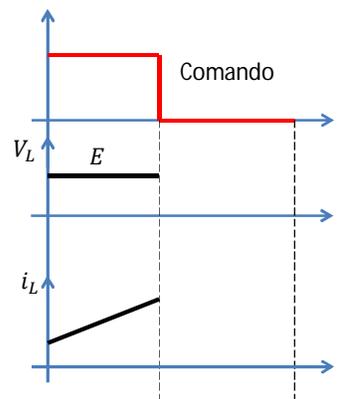
24



Conversores CC/CC

- Conversor Buck-boost em CCM



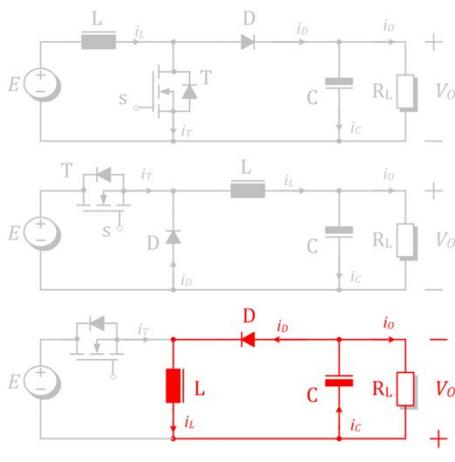


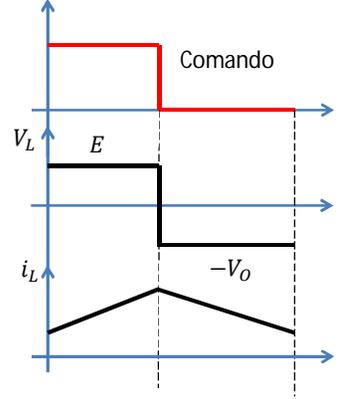
25



Conversores CC/CC

- Conversor Buck-boost em CCM





26

gpep
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Conversores CC/CC

- Conversor Buck-boost em CCM

$$ET_{on} = -(-V_O)T_{off}$$

$$V_O = \frac{ED}{1-D}$$

Para: $0 \leq t \leq T_{on}$

$$L \frac{di_L}{dt} = E$$

$$L = \frac{ED}{\Delta I_L f_s}$$

$$I_T = DI_L$$

$$I_D = I_O = (1-D)I_L$$

27

gpep
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Conversores CC/CC

- Conversor Buck-boost em CCM

$$V_O = \frac{ED}{1-D}$$

$$L = \frac{ED}{\Delta I_L f_s}$$

$$C = \frac{I_L(1-D)D}{f_s \Delta V_O}$$

$$I_T = DI_L$$

$$I_D = (1-D)I_L$$

$$V_{Tmax} = E + V_O$$

$$V_{Dmax} = E + V_O$$

$$I_D T_{on} = C \Delta V_O$$

28

gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Conversores CC/CC

- Conversor Buck-boost em condição crítica

$$I_{Lmax} = \Delta I_L = 2I_L$$

$$L = \frac{ED}{\Delta I_L f_s}$$

$$L_{crit} = \frac{ED}{2I_L f_s}$$

$$I_{Lcrit} = \frac{ED}{2L f_s}$$

$$\frac{ED}{2L f_s} = I_o = \frac{V_o}{R_L} = \frac{ED}{R_L(1-D)}$$

$$(1-D)^2 = \frac{2L f_s}{R_L} = K$$

29

gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Conversores CC/CC

- Conversor Buck-boost em DCM

$$ET_{on} = -(-V_o)(T_s - T_{on} - t_x)$$

$$V_o = \frac{ED}{1 - D - \frac{t_x}{T_s}}$$

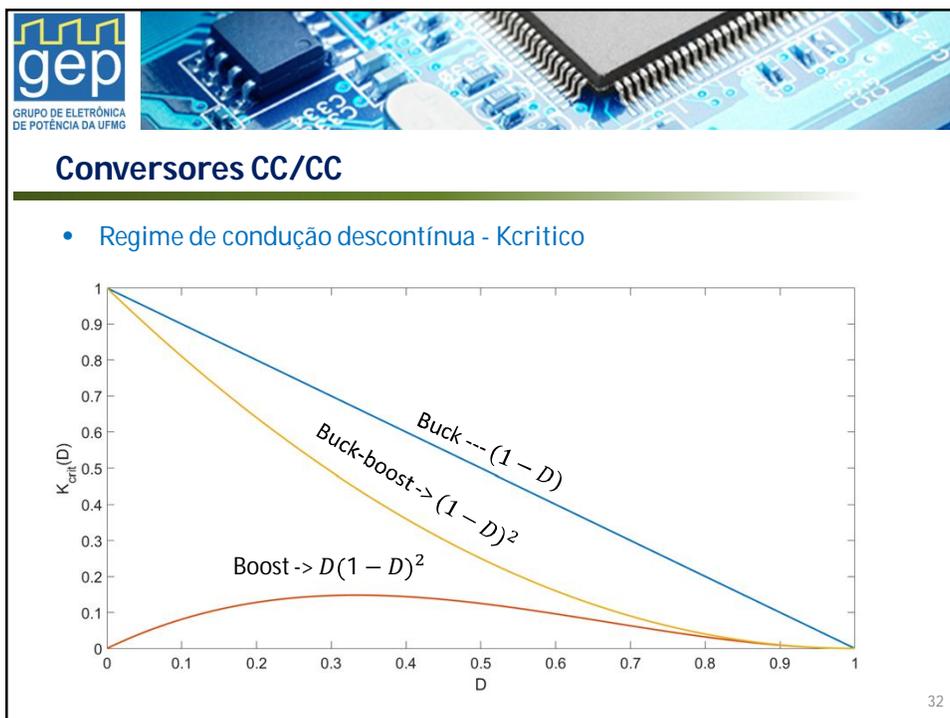
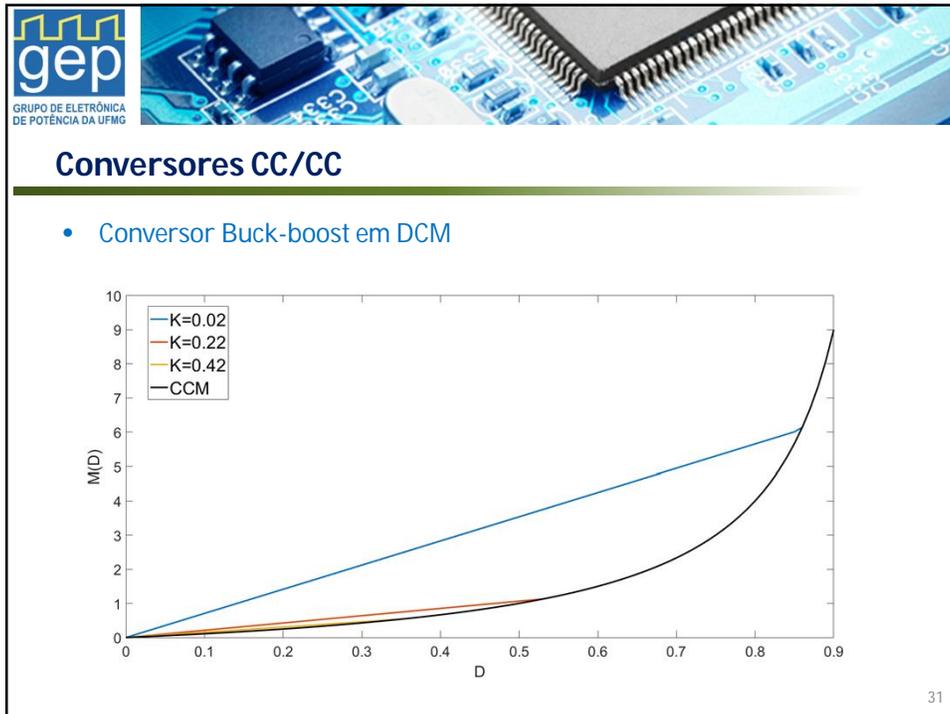
$$I_o = \frac{V_o}{R_L} = \frac{I_{Lmax}}{2} \left(1 - D - \frac{t_x}{T_s}\right)$$

$$I_{Lmax} = \Delta I_L = \frac{ED}{L f_s}$$

$$V_o = \frac{ED}{\sqrt{K}}$$

$$D = \frac{V_o \sqrt{K}}{E}$$

30





Conversores CC/CC

- Resumo dos Conversores Não-Isolados

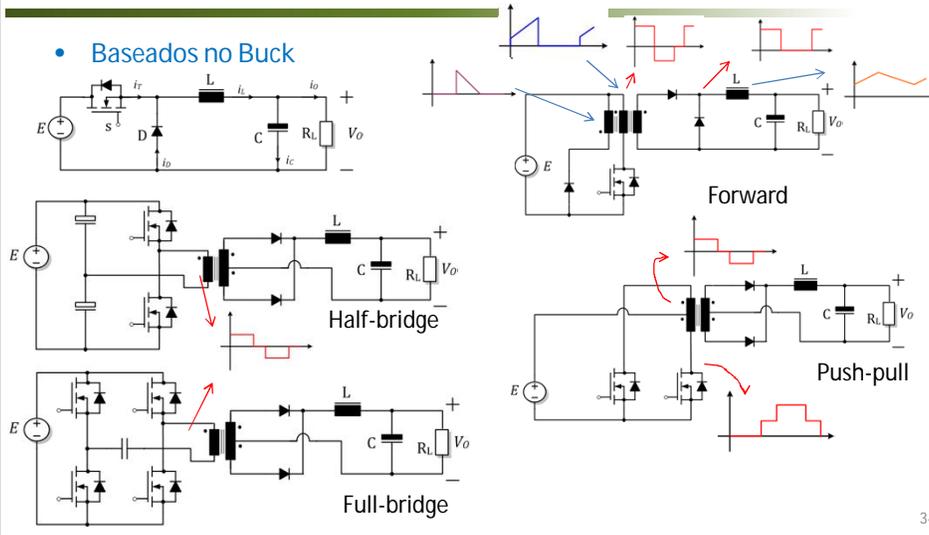
Parâmetros	Buck	Boost	Buck-Boost
V_o/E (CCM)	D	$\frac{1}{1-D}$	$-\frac{D}{1-D}$
ΔI_L	$\frac{(E - V_o)D}{Lf_s}$	$\frac{ED}{Lf_s}$	$\frac{ED}{Lf_s}$
ΔV_o	$\frac{\Delta I_L}{8f_s C}$	$\frac{I_o D}{f_s C}$	$\frac{I_o D}{f_s C}$
K_{crit}	$(1 - D)$	$D(1 - D)^2$	$(1 - D)^2$
L_{crit}	$\frac{E(1 - D)D}{2I_o f_s}$		
V_o/E (DCM)	$\frac{2}{1 + \sqrt{1 + 4K/D^2}}$	$\frac{1 + \sqrt{1 + 4D^2/K}}{2}$	$\frac{D}{\sqrt{K}}$
Voltage Stress	E	V_o	$E + V_o$
Corrente de entrada	Pulsada	Continua	Pulsada
Corrente de Saída	Continua	Pulsada	Pulsada

33



Conversores CC/CC – Isolados

- Baseados no Buck

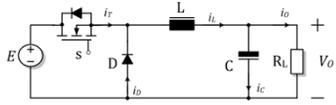


34

gcp
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Conversores CC/CC – Isolados

- Baseados no Buck



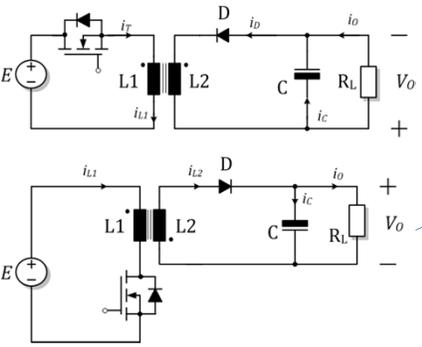
Parâmetros	Forward	Push-Pull	HB	FB
Vo	EDN_2/N_1	EDN_2/N_1	$EDN_2/2N_1$	EDN_2/N_1
Uso do núcleo	1Q	2Q	2Q	2Q
Voltage Stress	$2E$	$2E$	$\frac{E}{2}$	E
Current Stress	1	1	2	1
Power Range	~200W	100W-500W	100W-500W	>500W

35

gcp
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Conversores CC/CC – Isolados

- Conversor Flyback



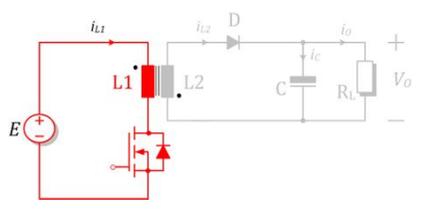
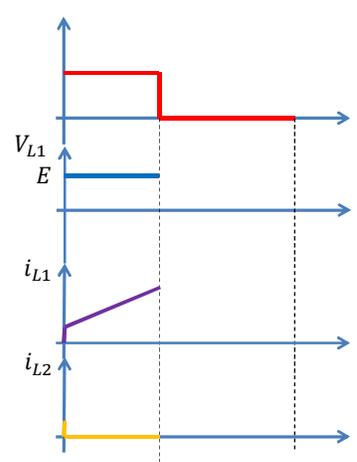
- Conversor barato;
- Uso de apenas uma quadrante do núcleo;
- Uso geralmente limitado a 100W;

36

gpep
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Conversores CC/CC – Isolados

- Conversor Flyback

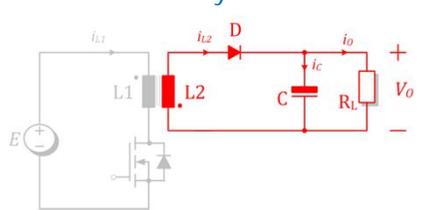
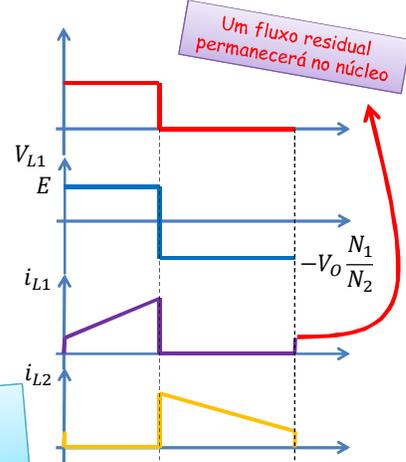
- Armazena energia na indutância de magnetização do "transformador";
- O diodo se mantém bloqueado;
- O capacitor alimenta a carga;

37

gpep
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Conversores CC/CC – Isolados

- Conversor Flyback

- Descarrega a energia armazenada no secundário;
- O diodo conduz e o transistor corta;
- Carrega o capacitor;

Note que elemento magnético não atua como transformador, mas como um indutor acoplado

38

gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Conversores CC/CC – Isolados

- Conversor Flyback - CCM

$$V_o = \frac{ED}{1-D} \frac{N_2}{N_1}$$

$$L_1 = \frac{ED}{\Delta I_L f_s}$$

$$C = \frac{I_o D}{f_s \Delta V_o}$$

$$L_2 = L_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

39

gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Conversores CC/CC – Isolados

- Conversor Flyback - DCM

$$V_o = \frac{ED}{\sqrt{K}} \frac{N_2}{N_1}$$

$$K = \frac{2L_2 f_s}{R_L}$$

$$L_1 = \frac{ED}{\Delta I_L f_s}$$

$$C = \frac{I_o D}{f_s \Delta V_o}$$

$$L_2 = L_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

40