

Instituto Mauá de Tecnologia
Núcleo de Sistemas Eletrônicos Embarcados - NSEE
Simulador motor BLDC

Juliano Tusi Amaral Laganá Pinto
julianotusi@gmail.com

24 de junho de 2015



Sumário

1	Introdução	4
1.1	Objetivo	4
1.2	Sistema de interesse	4
1.3	Hipóteses	5
1.4	Modelo matemático	5
2	Implementação	7
2.1	Bloco BLDC	7
2.2	Bloco BLDC com lógica de comutação em blocos	8
3	Ferramentas adicionais	9
3.1	Medição de posição	9
3.2	Medição de velocidade	10

Revision History

Revision	Date	Author(s)	Description
1.0.0	16.10.14	Juliano Laganá	Criação do documento
1.0.1	21.10.14	Juliano Laganá	Adição do encoder e do método M/T aos blocos especificados
1.0.2	24.06.15	Juliano Laganá	Substituição do modelo elétrico de fases individuais pelo modelo elétrico com as fases acopladas

1 Introdução

1.1 Objetivo

O objetivo desse documento é disponibilizar um manual de uso da biblioteca “BLDC.slx” para simulação do motor DC sem escovas (BLDC).

1.2 Sistema de interesse

O sistema de interesse é um motor DC sem escovas acoplado à uma carga constante. A figura 1.1 ilustra um modelo simplificado do sistema. Os torques mostrados no desenho são:

- T_e : Torque elétrico gerado pelo motor.
- T_d : Torque de atrito viscoso no mancal.
- T_l : Torque da carga.

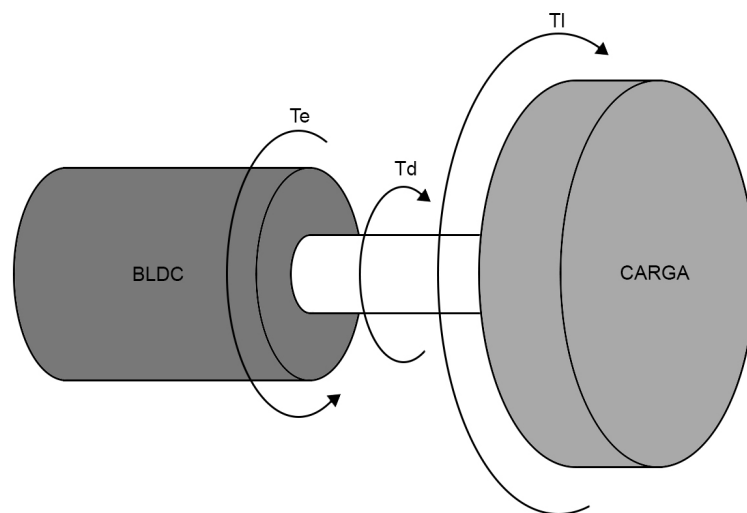


Figura 1.1: Modelo simplificado do sistema

1.3 Hipóteses

- Todas as fases de alimentação do BLDC tem a mesma resistência.
- Todas as fases de alimentação do BLDC tem a mesma indutância.
- Todas as partes do sistema são consideradas corpos rígidos.
- O atrito no mancal é diretamente proporcional à velocidade angular do rotor em relação ao estator.
- A força contraeletromotriz gerada em cada fase de alimentação tem o formato trapezoidal.

1.4 Modelo matemático

O modelo matemático implementado é o proposto por [1].

- Dinâmica mecânica:

$$J \cdot \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_e - T_l - K_d \cdot \frac{d\theta_m}{dt}$$

- Dinâmica elétrica:

$$v_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b$$

$$v_{bc} = R(i_a + 2i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a + 2i_b) + e_b - e_c$$

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

- Forças contraeletromotrizes geradas em cada fase:

$$e_a = \frac{f_a(\theta_e) \cdot K_e}{2} \cdot \frac{d\theta_m}{dt}$$

$$e_b = \frac{f_b(\theta_e) \cdot K_e}{2} \cdot \frac{d\theta_m}{dt}$$

$$e_c = \frac{f_c(\theta_e) \cdot K_e}{2} \cdot \frac{d\theta_m}{dt}$$

- Torque gerado por cada fase e torque elétrico total:

$$T_a = \frac{f_a(\theta_e) \cdot K_t \cdot i_a}{2}$$

$$T_b = \frac{f_b(\theta_e) \cdot K_t \cdot i_b}{2}$$

$$T_c = \frac{f_c(\theta_e) \cdot K_t \cdot i_c}{2}$$

$$T_e = T_a + T_b + T_c$$

- Relação entre ângulo elétrico e ângulo mecânico:

$$\theta_e = \theta_m \cdot \frac{P}{2}$$

J = Inércia do sistema motor+carga

K_d = Coeficiente de atrito viscoso do mancal

K_e = Constante de força contraeletromotriz

K_t = Constante de torque

P = Número de pólos

θ_m = Ângulo do rotor em relação ao estator

θ_e = Ângulo elétrico

L = Indutância de cada fase

R = Resistência de cada fase

v_{ab} = Tensão entre as fase a e b

v_{bc} = Tensão entre as fases b e c

i_a = Corrente na fase a

i_b = Corrente na fase b

i_c = Corrente na fase c

e_a = Força contraeletromotriz gerada na fase a

e_b = Força contraeletromotriz gerada na fase b

e_c = Força contraeletromotriz gerada na fase c

T_a = Torque elétrico gerado pela fase a no rotor

T_b = Torque elétrico gerado pela fase b no rotor

T_c = Torque elétrico gerado pela fase c no rotor

T_e = Torque elétrico total aplicado no rotor

$f_a(\theta_e)$ = Função que reproduz o comportamento trapezoidal da força contraeletromotriz na fase a

$f_b(\theta_e)$ = Função que reproduz o comportamento trapezoidal da força contraeletromotriz na fase b

$f_c(\theta_e)$ = Função que reproduz o comportamento trapezoidal da força contraeletromotriz na fase c

2 Implementação

2.1 Bloco BLDC

O modelo matemático apresentado na seção 1.4 foi implementado no bloco “BLDC” ilustrado na figura 2.1. Todos os parâmetros do motor podem ser alterados clicando-se duas vezes em cima do bloco.

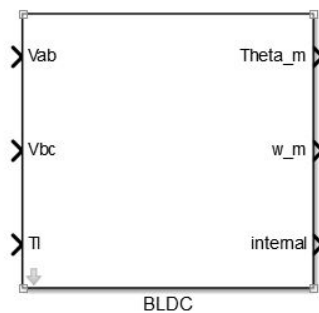


Figura 2.1: Bloco simulink para simulação do BLDC

- Entradas

1. Vab - Tensão entre as fases a e b [V]
2. Vbc - Tensão entre as fases b e c [V]
3. Tl - Torque da carga [N.m]

- Saídas

1. Theta_m - Ângulo entre o rotor e o estator (θ_m) [rad]
2. w_m - Velocidade angular entre o rotor e o estator ($\frac{d\theta_m}{dt}$) [rad/s]
3. internal - Sinal multiplexado [4x1] composto pelos seguintes sinais:
 - Correntes [3x1] - i_a , i_b e i_c [A]
 - Torques [3x1] - T_a , T_b e T_c [N.m]
 - FCEMs [3x1] - e_a , e_b e e_c [V]
 - Torque total - T_e [N.m]

2.2 Bloco BLDC com lógica de comutação em blocos

Para o devido funcionamento do BLDC é necessário comutar a tensão entre cada fase periodicamente. O bloco apresentado na figura 2.2 implementa internamente a estratégia de comutação em blocos através da utilização de três sensores de efeito hall separados por 120 graus. Todos os parâmetros do motor podem ser alterados clicando-se duas vezes em cima do bloco.

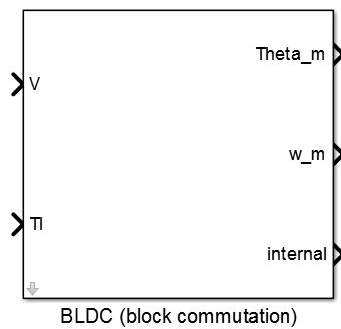


Figura 2.2: Bloco simulink para simulação do BLDC utilizando comutação em blocos

- Entradas

1. V - Tensão aplicada nas fases [V]
2. Tl - Torque da carga [N.m]

- Saídas

1. Theta_m - Ângulo entre o rotor e o estator (θ_m) [rad]
2. w_m - Velocidade angular entre o rotor e o estator ($\frac{d\theta_m}{dt}$) [rad/s]
3. internal - Sinal multiplexado [4x1] composto pelos seguintes sinais:
 - Correntes [3x1] - i_a , i_b e i_c [A]
 - Torques [3x1] - T_a , T_b e T_c [N.m]
 - FCEMs [3x1] - e_a , e_b e e_c [V]
 - Torque total - T_e [N.m]
 - Hall [3x1] - H_1 , H_2 e H_3 (Níveis lógicos de cada sensor Hall acoplado ao motor)

3 Ferramentas adicionais

3.1 Medição de posição

Para medição de posição angular do rotor foi desenvolvido um bloco que simula o funcionamento de um encoder de quadratura, ilustrado na figura 3.1. O número de pulsos por revolução pode ser configurado clicando-se duas vezes no bloco.

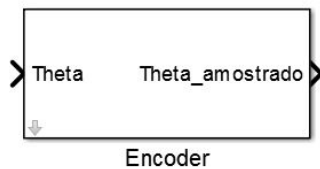


Figura 3.1: Bloco simulink para simulação de um encoder de quadratura

- Entradas
 1. Theta - Ângulo mecânico entre o rotor e o estator. [graus]
- Saídas
 1. Theta_amostrado - Ângulo mecânico entre o rotor e o estator, amostrado pelo encoder de quadratura simulado. [graus]
- Restrições
 1. Para o correto funcionamento desse bloco, o step size da simulação deve ser configurado para nunca exceder $\frac{360}{4 \cdot N_r \cdot V_{máx}}$ segundos; onde N_r é o número de pulsos por rotação do encoder (especificado clicando-se duas vezes em cima do bloco) e $V_{máx}$ é o valor máximo da derivada da entrada Theta em graus/s. Exemplo: Para a correta simulação de um encoder com $N_r = 300$, amostrando um BLDC cuja velocidade angular atinge no máximo 1200 graus/s (portanto o valor máximo da derivada da entrada Theta também é 1200 graus/s), faz-se necessário configurar a simulação para que o step size nunca exceda $2,5 \cdot 10^{-4}$ segundos.

3.2 Medição de velocidade

O algoritmo M/T para estimação de velocidade [2] foi implementado no simulink e está ilustrado na figura 3.2

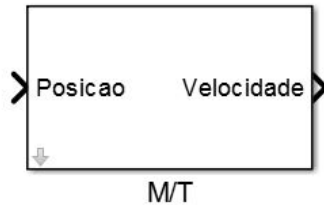


Figura 3.2: Bloco que implementa o algoritmo de estimação de velocidade M/T

- Entradas
 1. Posicao - Essa entrada deve ser conectada à saída “Theta_amostrado” do bloco simulador de encoder de quadratura. [graus]
- Saídas
 1. Velocidade - Velocidade estimada pelo algoritmo M/T. [graus/s]

Referências Bibliográficas

- [1] Stefan Baldursson. Bldc motor modelling and control-a matlab®/simulink® implementation. 2005.
- [2] Tsutomu Ohmae, Toshihiko Matsuda, Kenzo Kamiyama, and Makoto Tachikawa. A microprocessor-controlled high-accuracy wide-range speed regulator for motor drives. *IEEE Transactions on industrial electronics*, IE-29(3):207–211, August 1982.