



دانشگاه کاشان

# بخش چهارم:

## روش‌های کنترل موتورهای بر اشلس DC

- ❑ مقدمه
- ❑ روش تنظیم جریان لینک dc
- ❑ ریپل گشتاور در موتور BLDC
- ❑ روش تنظیم مستقل جریان سه فاز
- ❑ روش کنترل مستقیم گشتاور (DTC)
- ❑ روش کنترل پیش بین مدل (MPC)



✓ موتورهای براشلس DC (BLDC)، با توجه به شباهت مدل دینامیکی شان با موتورهای جاروبک دار DC نوع آهنربای دائم، می توانند به روش مشابه همانند موتورهای DC کنترل شوند.

✓ کنترل در موتورهای DC بر مبنای تنظیم جریان است و لذا در روشهای متداول کنترل موتورهای BLDC از کنترل جریان استفاده می شوند.

✓ روشهای متداول کنترل موتورهای BLDC:

○ تنظیم جریان لینک DC

○ تنظیم جریان سه فاز

✓ سایر روشهای کنترل موتورهای BLDC:

○ کنترل مستقیم گشتاور (DTC)

○ کنترل مدل پیش بین (MPC)

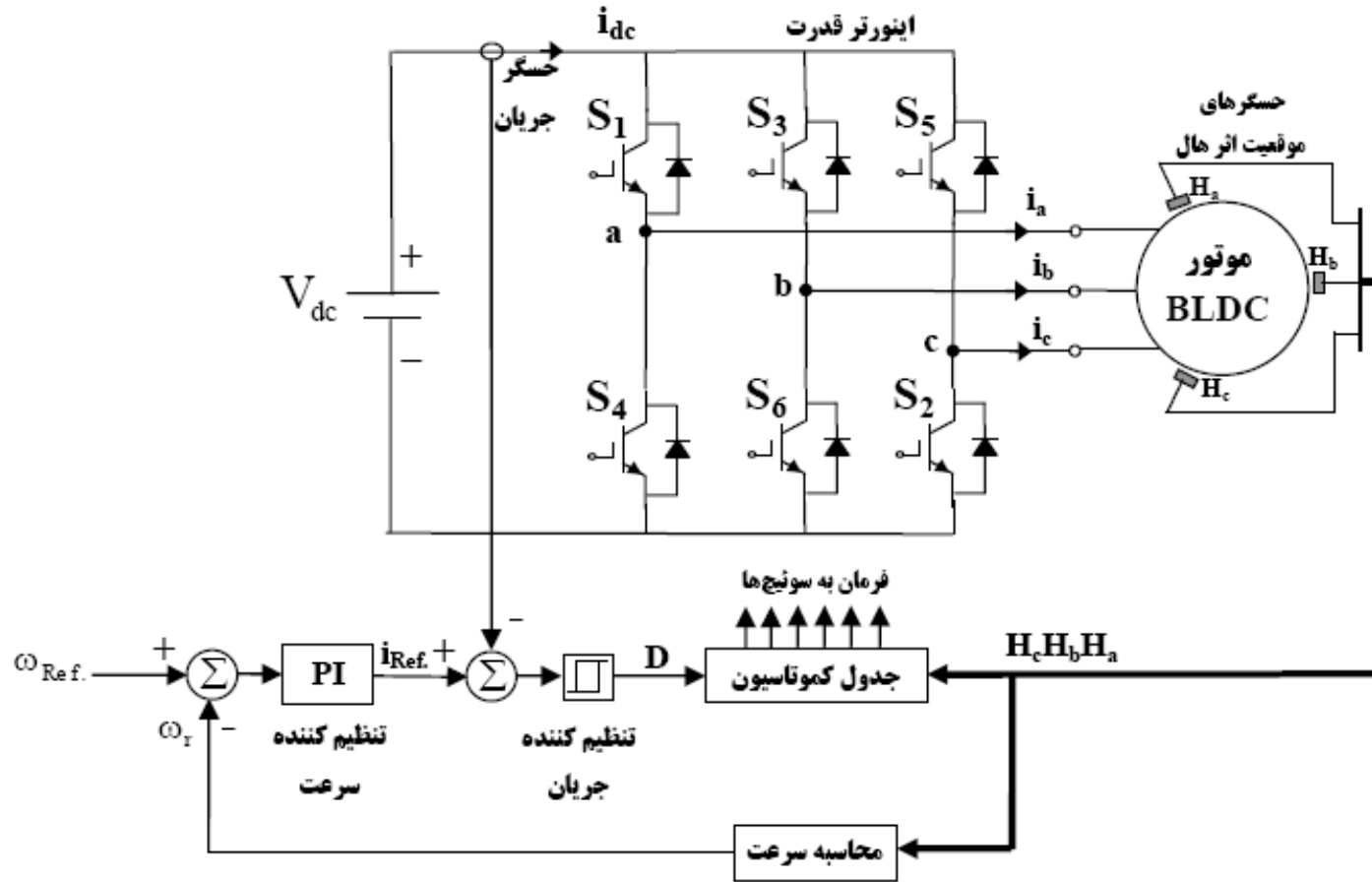
○ کنترل برداری بهبود یافته (Improved FOC)

○ کنترل مود لغزشی (SMC)

○ ....

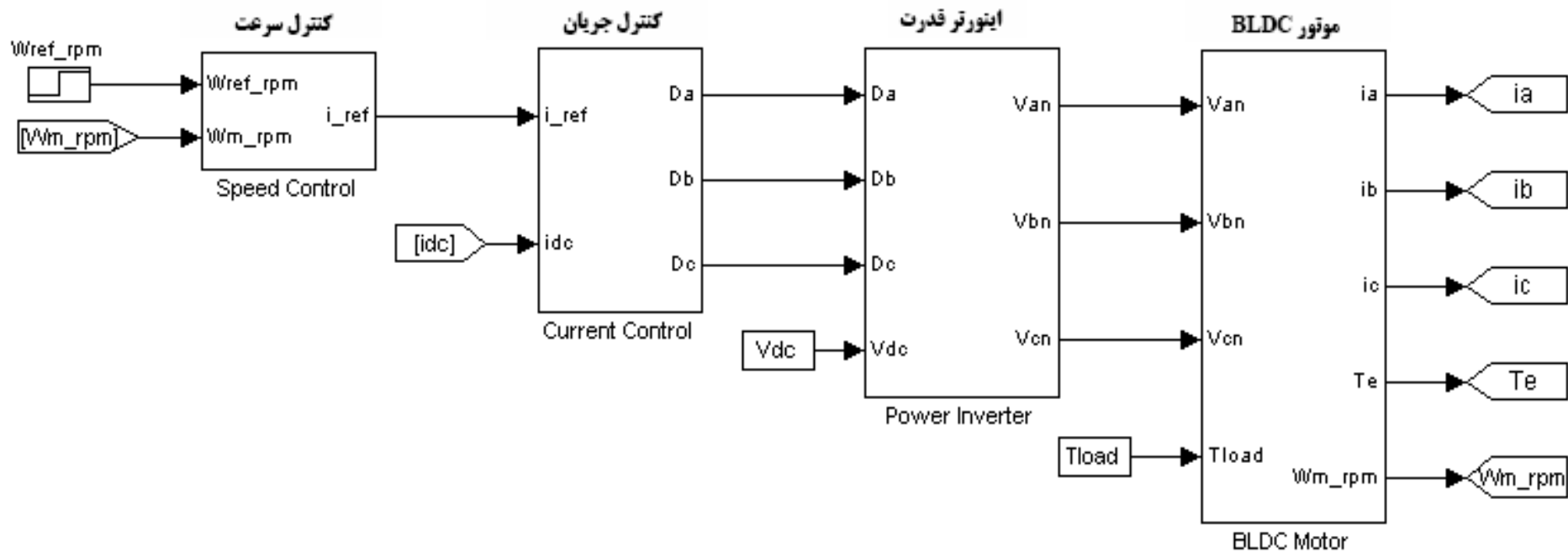
✓ در ادامه به بررسی چند روش متداول کنترل این موتورهای پرداخته می شود.

✓ در ساختار پایه ای و متداول درایو زیر، بجای کنترل جریان فازها، جریان لینک dc کنترل می شود، زیرا در هر لحظه تنها دو فاز جریان را هدایت می کنند و جریان فازها دقیقاً برابر جریان لینک dc است.



سیستم درایو موتور BLDC با اینورتر شش سوئیچ

- ✓ جهت شبیه سازی درایو، ابتدا باید مدل دینامیکی کل درایو شامل موتور + اینورتر + کنترلر در سیمولینک پیاده سازی گردد.
- ✓ برای شبیه سازی اینورتر می توان عملکرد آنرا با استفاده از توابع سوئیچینگ مدل نمود و یا از مدل اینورتر کتابخانه سیمولینک استفاده نمود.





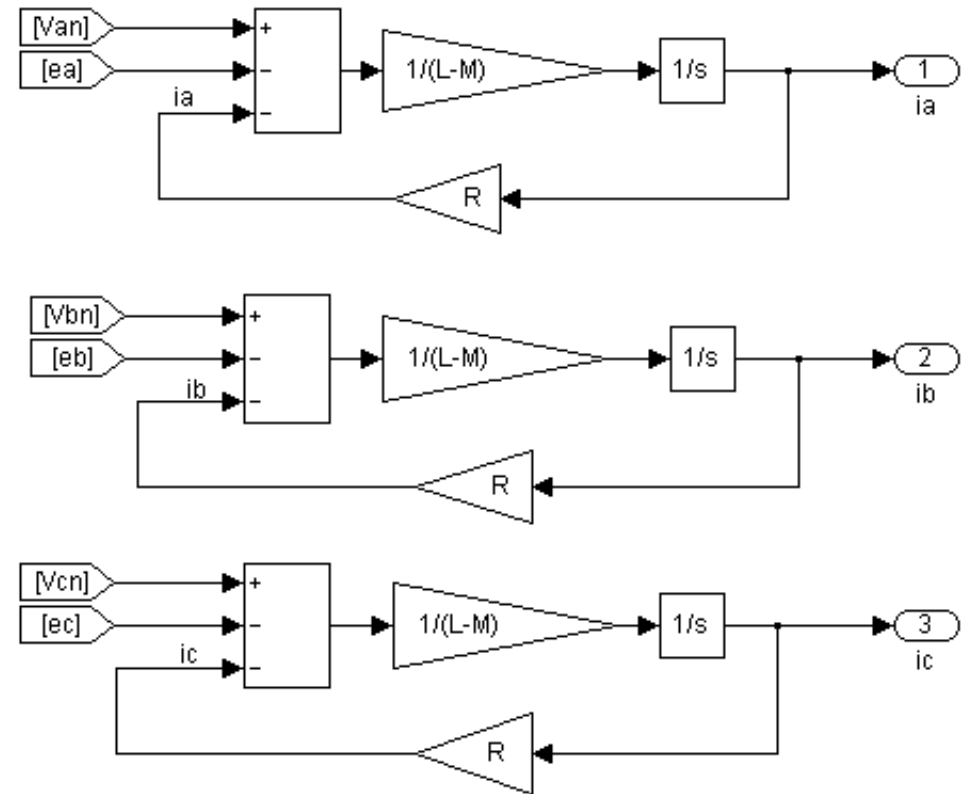
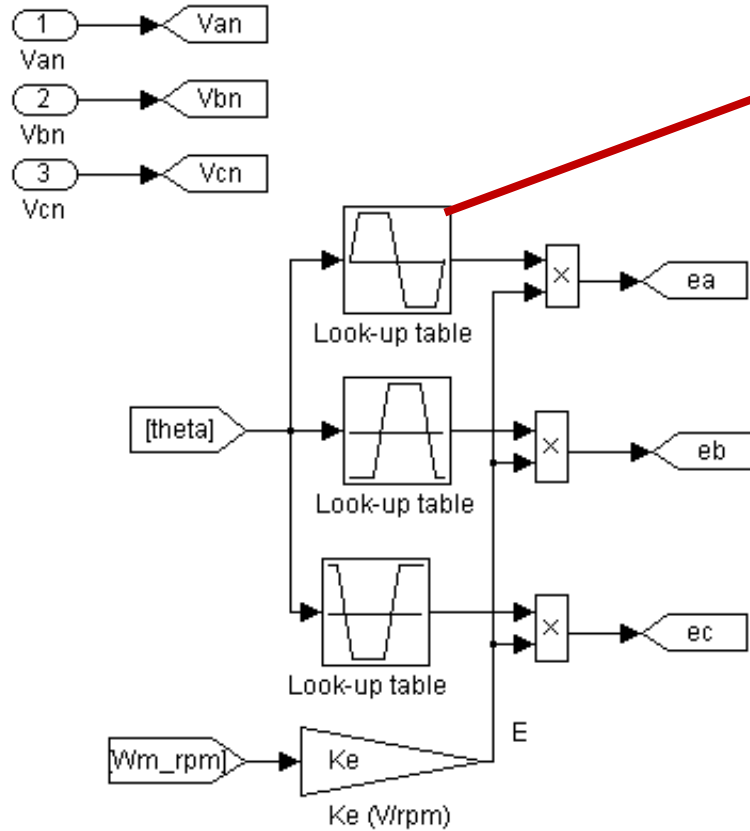
# شبیه سازی درایو BLDC با تنظیم جریان لینک dc

پیاده سازی مدل موتور BLDC در سیمولینک

❖ محاسبه جریانها:

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

$$e_a = \begin{cases} (6E/\pi) \cdot \theta_r & 0 < \theta_r < \pi/6 \\ E & \pi/6 < \theta_r < 5\pi/6 \\ -(6E/\pi) \cdot \theta_r + 6E & 5\pi/6 < \theta_r < 7\pi/6 \\ -E & 7\pi/6 < \theta_r < 11\pi/6 \\ (6E/\pi) \cdot \theta_r - 12E & 11\pi/6 < \theta_r < 2\pi \end{cases}$$





# شبیه سازی درایو BLDC با تنظیم جریان لینک dc

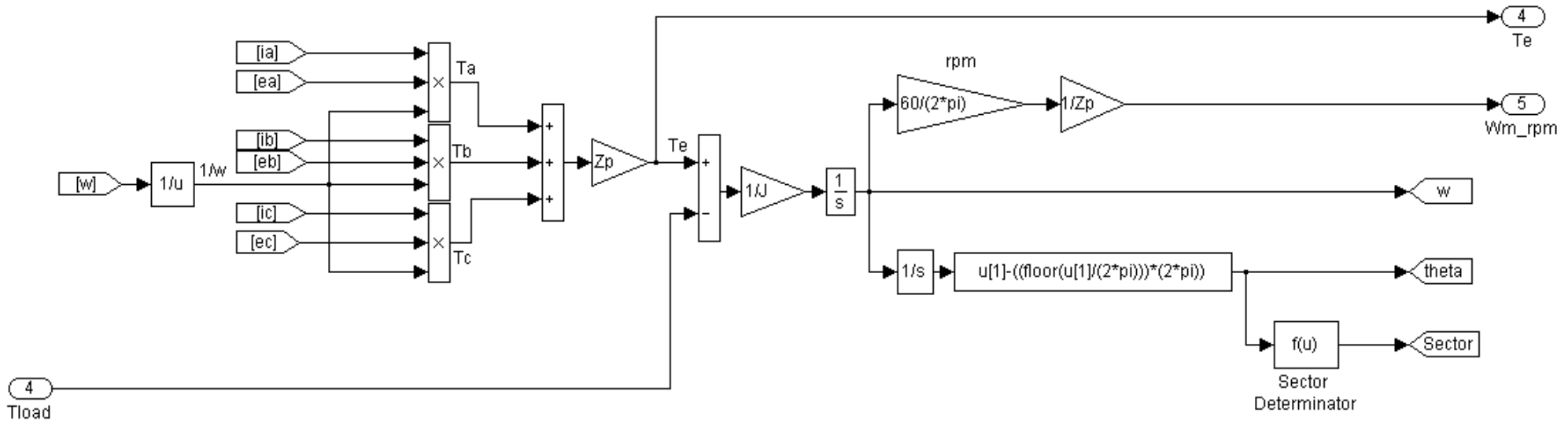
➤ پیاده سازی مدل موتور BLDC در سیمولینک

❖ محاسبه گشتاور، سرعت و موقعیت روتور:

$$T_e = \frac{Z_p}{\omega_r} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c)$$

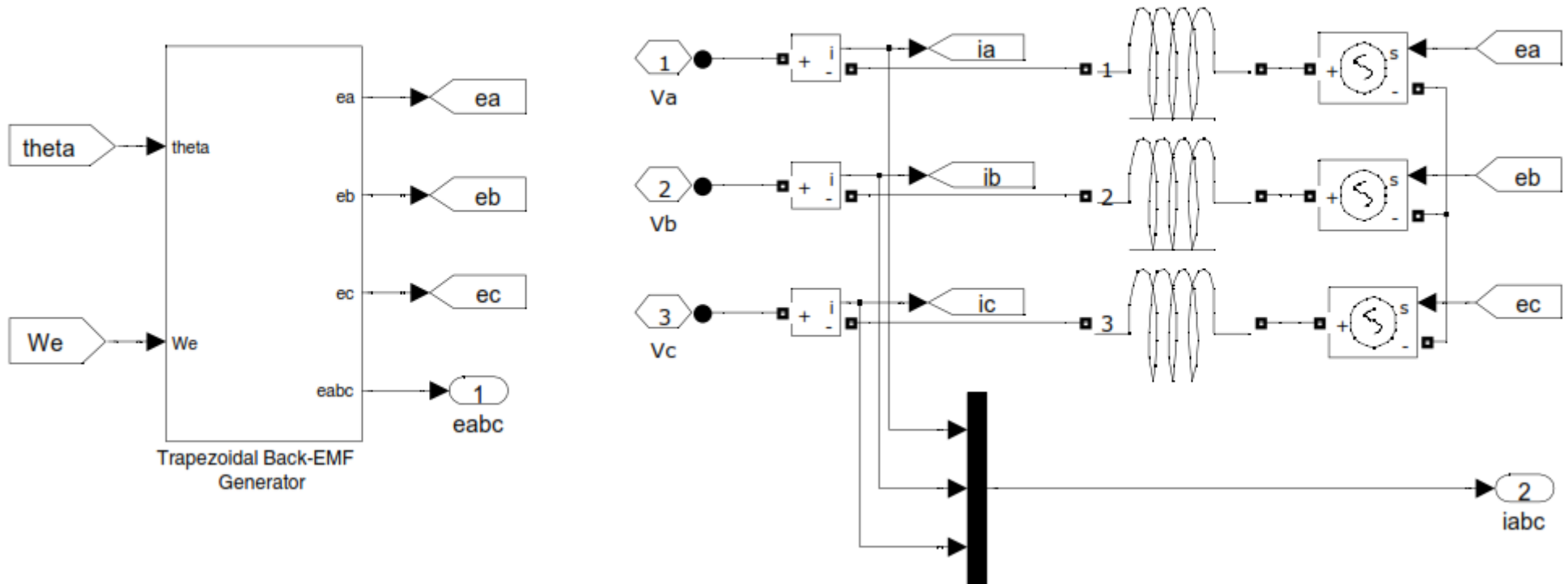
$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_r}{dt} + B_f \omega_r$$

✓ در درایو واقعی، موقعیت روتور و اینکه در کدام بازه ۶۰ درجه ای (Sector) قرار دارد، معمولاً توسط سنسورهای موقعیت اثر هال تخمین زده می شود. در شبیه سازی مقدار Sector از روی متغیر Theta ساخته شده از روی سرعت روتور بدست می آید.



✓ می توان از المانهای مداری بجای مدلسازی ریاضی موتور BLDC هم استفاده نمود.

✓ در این روش، بجای مدل کردن اجزای موتور با روابط معادل ریاضی شان، مستقیماً از خودشان استفاده می کنیم.





# شبیه سازی درایو BLDC با تنظیم جریان لینک dc

پیاده سازی مدل موتور BLDC در سیمولینک

✓ مدل آماده این موتور در Toolbox با نام Sim-power-systems نرم افزار سیمولینک هم وجود دارد.

Block Parameters: Permanent Magnet Synchronous Machine

Permanent Magnet Synchronous Machine (mask) (link)

Implements a 3-phase permanent magnet synchronous machine with sinusoidal or trapezoidal back EMF. The sinusoidal machine is modelled in the dq rotor reference frame and the trapezoidal machine is modelled in the abc reference frame. Stator windings are connected in wye to an internal neutral point.

The preset models are available only for the Sinusoidal back EMF machine type.

Configuration Parameters Advanced

Stator phase resistance Rs (ohm): 2.8750

Stator phase inductance Ls (H): 8.5e-3

Specify: Flux linkage established by magnets (V.s)

Flux linkage established by magnets (V.s): 0.175

Voltage Constant (V\_peak L-L / krpm): 126.966

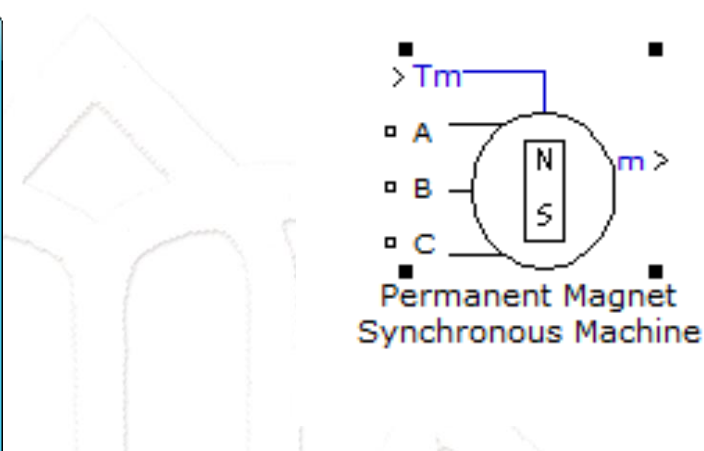
Torque Constant (N.m / A\_peak): 1.05

Back EMF flat area (degrees): 120

Inertia, friction factor, pole pairs [ J(kg.m^2) F(N.m.s) p()]: [0.0008 0.001 4]

Initial conditions [ wm(rad/s) thetam(deg) ia,ib(A) ]: [0,0, 0,0]

OK Cancel Help Apply



Block Parameters: Permanent Magnet Synchronous Machine

Permanent Magnet Synchronous Machine (mask) (link)

Implements a 3-phase permanent magnet synchronous machine with sinusoidal or trapezoidal back EMF. The sinusoidal machine is modelled in the dq rotor reference frame and the trapezoidal machine is modelled in the abc reference frame. Stator windings are connected in wye to an internal neutral point.

The preset models are available only for the Sinusoidal back EMF machine type.

Configuration Parameters Advanced

Back EMF waveform: Trapezoidal

Mechanical input: Torque Tm

OK Cancel Help Apply



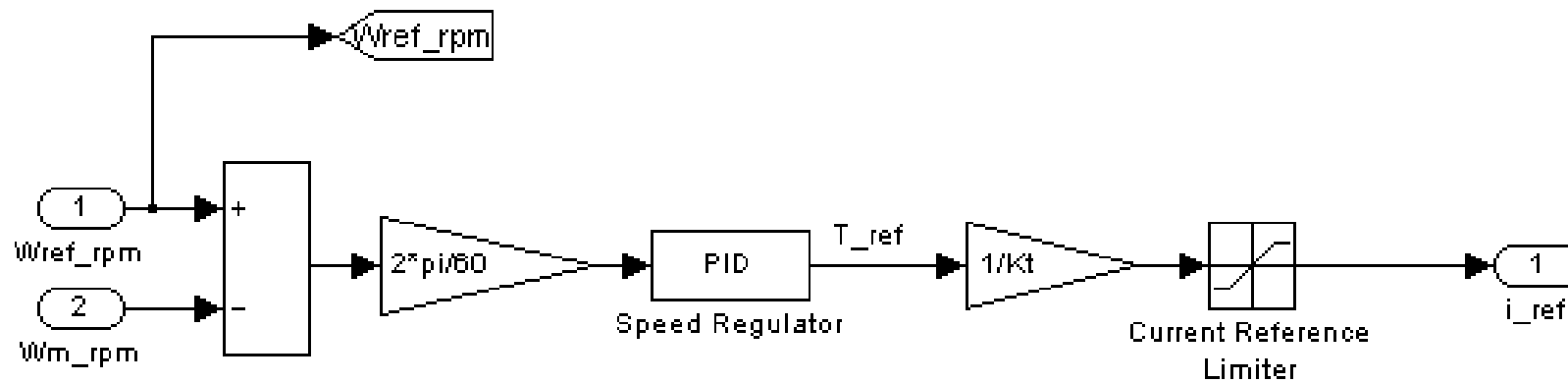




## □ شبیه سازی درایو BLDC با تنظیم جریان لینک dc

➤ پیاده سازی کنترل کننده سرعت

✓ کنترل کننده سرعت در تمامی درایوهای الکتریکی صنعتی و همچنین درایو موتورهای BLDC از نوع PI است.



✓ تنظیم کنترل کننده PI سرعت می تواند به روش سعی و خطا انجام پذیرد و یا با استفاده از تابع تبدیل دینامیک سرعت موتور و به روش حذف صفر و قطب صورت گیرد.



## شبیه سازی درایو BLDC با تنظیم جریان لینک dc

➤ مدلسازی اینورتر

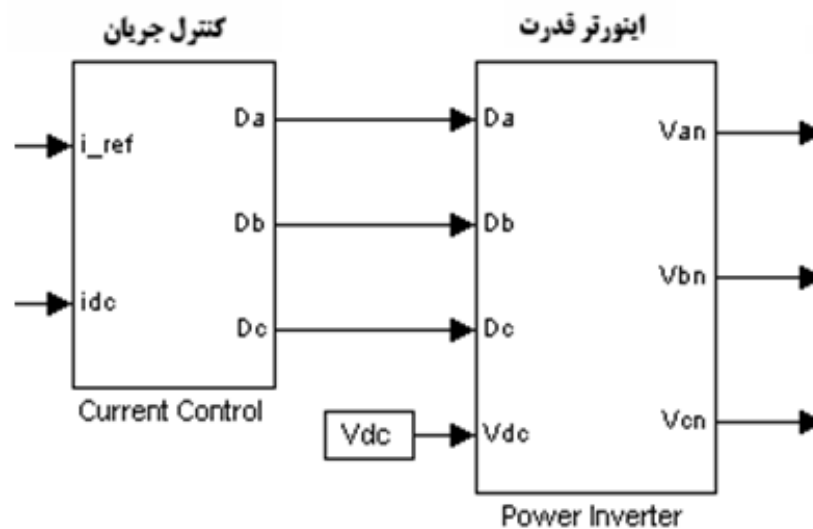
✓ برای مدل سازی اینورتر، دو روش اصلی وجود دارد:

(۱) مدلسازی عملکرد اینورتر بصورت ترکیبی از سوئیچهای ایده آل و عدم بکارگیری سوئیچ ها و اینورتر واقعی. در این روش، عملکرد سوئیچ ها با استفاده از توابع ریاضی موسوم به توابع سوئیچینگ مدل می شود.

(۲) استفاده از مدل اینورتر واقعی موجود در سیمولینک

✓ در روش توابع سوئیچینگ بجای بکار بردن معادل فیزیکی سوئیچ ها، عملکرد آنها مدل می گردد. توابع سوئیچینگ در واقع همان خروجی های کنترل کننده های جریان هستند. تمام متغیرهای قدرتی درایو (جریانها و ولتاژها) بر حسب توابع سوئیچینگ قابل نوشتن هستند.

✓ ورودی های بلوک اینورتر، فرمان های صادره برای سوئیچها بوده و خروجی های آن نیز ولتاژ هر فاز موتور نسبت به نقطه ستاره موتور هستند.





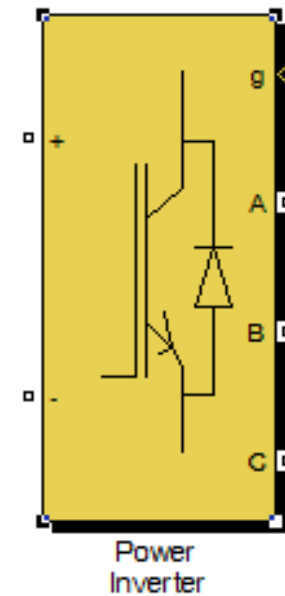
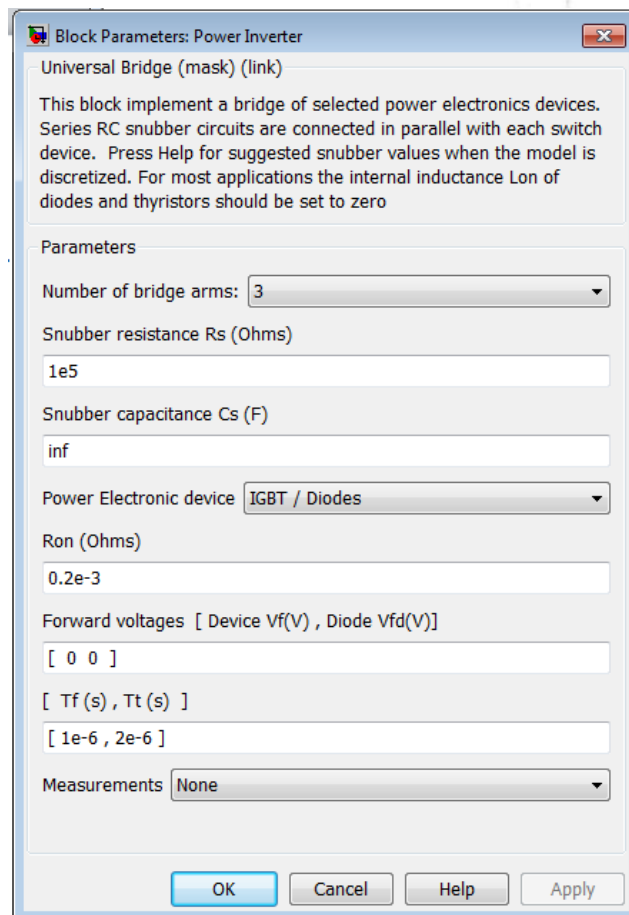
# شبیه سازی درایو BLDC با تنظیم جریان لینک dc

## ➤ مدل اینورتر واقعی در سیمولینک

✓ در Toolbox با نام Sim-power-systems نرم افزار سیمولینک مدل واقعی اینورتر هم وجود دارد که با اعمال فرمانهای مناسب به آن توسط کنترلر قابل استفاده است.

✓ پارامترهای مختلف اینورتر، از جمله تعداد فازها، نوع سوئیچها، مشخصات هر سوئیچ و ... قابل تنظیم هستند.

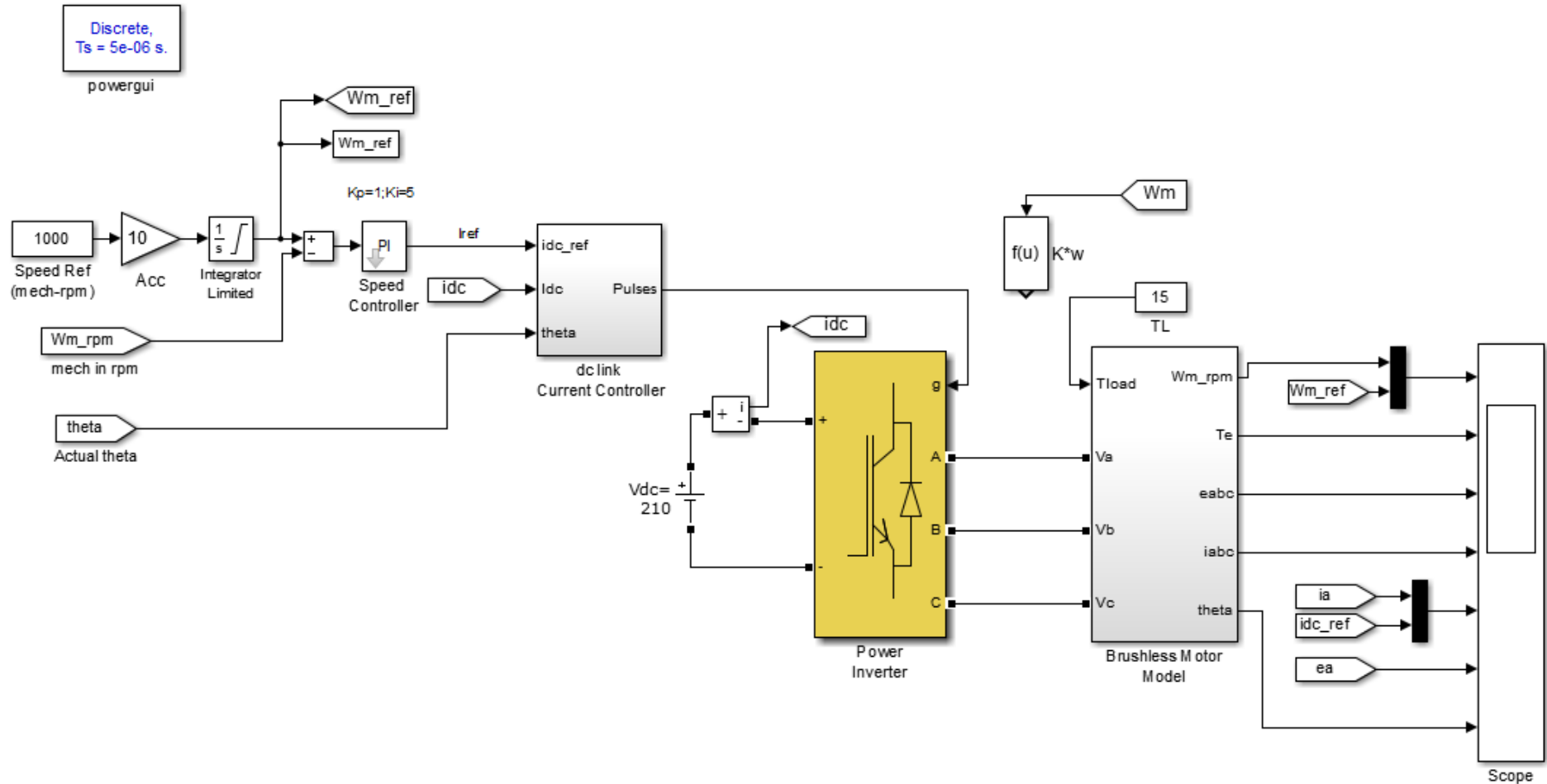
✓ در صورت استفاده از مدل اینورتر واقعی، خروجی آن ولتاژ قدرت است که باید به مدل قدرت (و نه مدل ریاضی) موتور اعمال نمهد. فرمان پالس g هم باید همخوانی با اینورتر واقعی داشته باشد.



# شبیه سازی درایو BLDC با تنظیم جریان لینک dc

➤ بلوک دیاگرام سیستم پیاده سازی شده در سیمولینک

- ✓ در این بخش مدل درایو موتور BLDC با اینورتر واقعی در سیمولینک پیاده سازی و شبیه سازی می گردد.
- ✓ سرعت مرجع موتور 1000 rpm، گشتاور بار 15 N.m و ولتاژ لینک dc برابر 210 ولت لحاظ شده است.

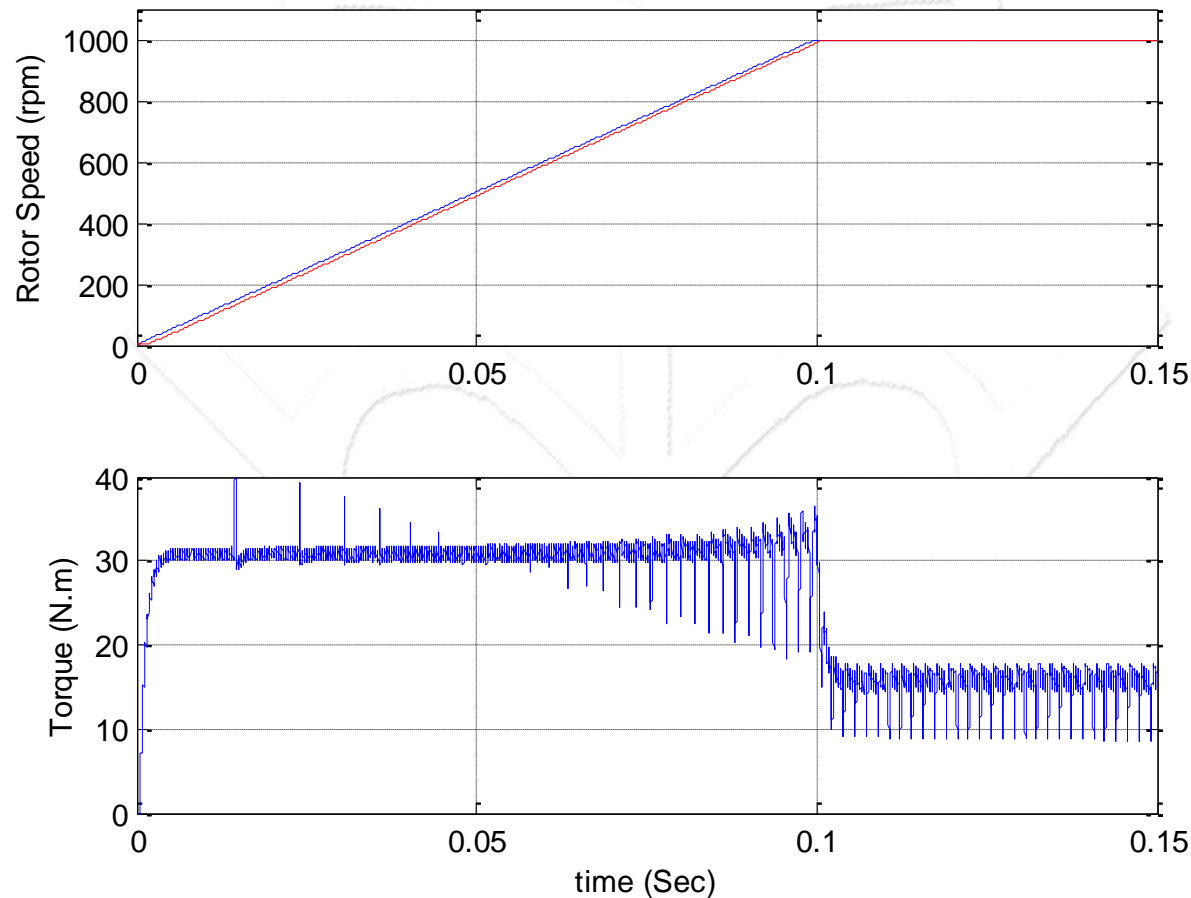




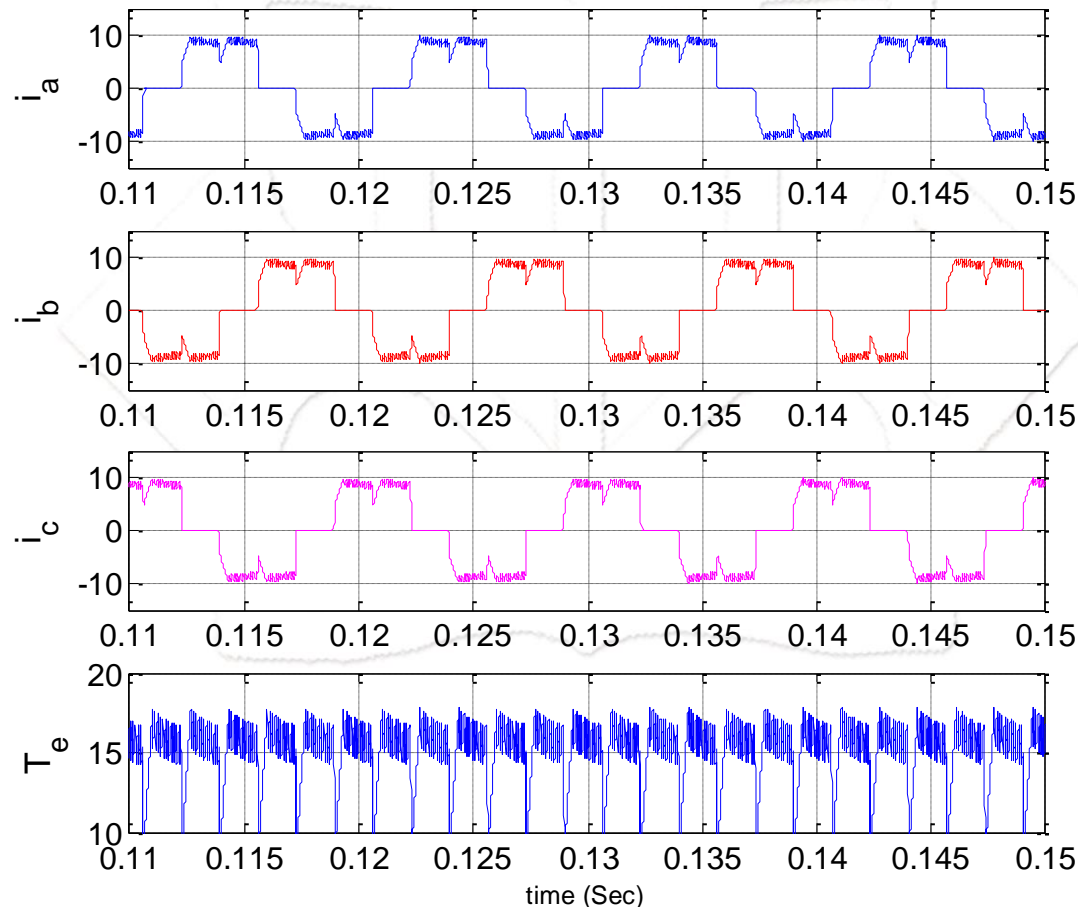
## شبیه سازی درایو BLDC با تنظیم جریان لینک dc

نتایج شبیه سازی: شکل موج سرعت و گشتاور

- ✓ مشاهده می شود که سرعت مرجع (1000 rpm) به خوبی دنبال می گردد.
- ✓ در حین راه اندازی، موتور گشتاور بیشتری تولید می کند و پس از طی مرحله شتاب گیری، گشتاور به مقدار گشتاور بار می رسد.
- ✓ نوسانات گشتاور هم در این روش کنترلی زیاد است که به دلیل کموتاسیون جریان بین فازهاست.



- ✓ شکل زیر تغییرات جریان یک موتور BLDC که تحت یک بار با گشتاور ثابت قرار گرفته است را نشان می دهد.
- ✓ جریان به شکل مطلوب مربعی نمی باشد و علت آن نیز بواسطه تاخیر ایجاد شده ناشی از سلفهای موتور است.
- ✓ این تاخیر سبب ایجاد ریپل گشتاور می شود که برای برخی کاربردها مناسب نمی باشد.





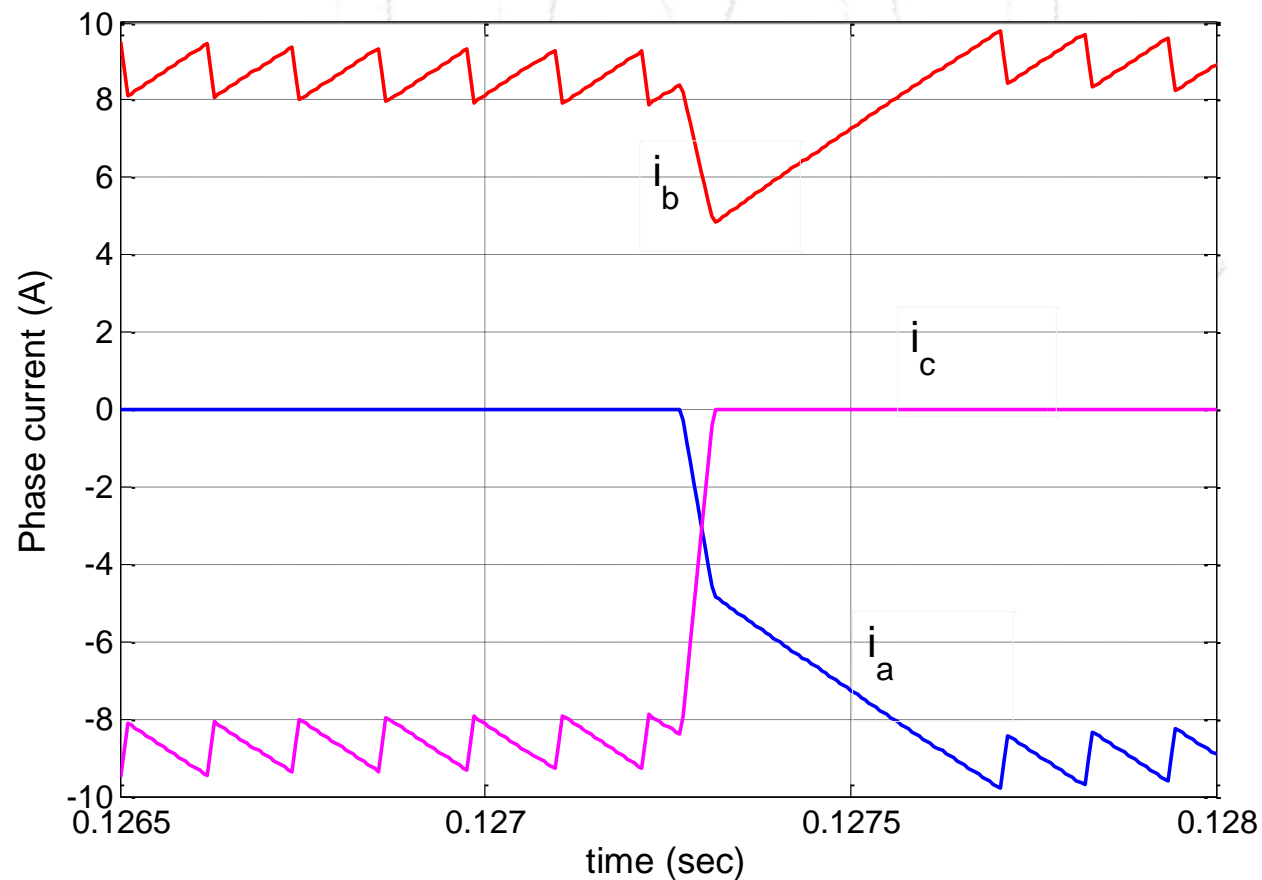
## شبیه سازی درایو BLDC با تنظیم جریان لینک dc

نتایج شبیه سازی: شکل موج جریان ها در بازه کموتاسیون

✓ ملاحظه می گردد که در هنگام کموتاسیون جریان، جریان فازی که مقدار آن باید ثابت باشد، دچار تغییر می گردد و در نتیجه گشتاور موتور دچار ریپل می گردد.

✓ علت این امر آنست که افزایش جریان و کاهش جریان دو فاز دخیل در کموتاسیون یکسان نیست.

✓ وجود نوسان و خطای حالت ماندگار در شکل موج جریانها به دلیل استفاده از کنترلرهای جریان هیستریزس است.



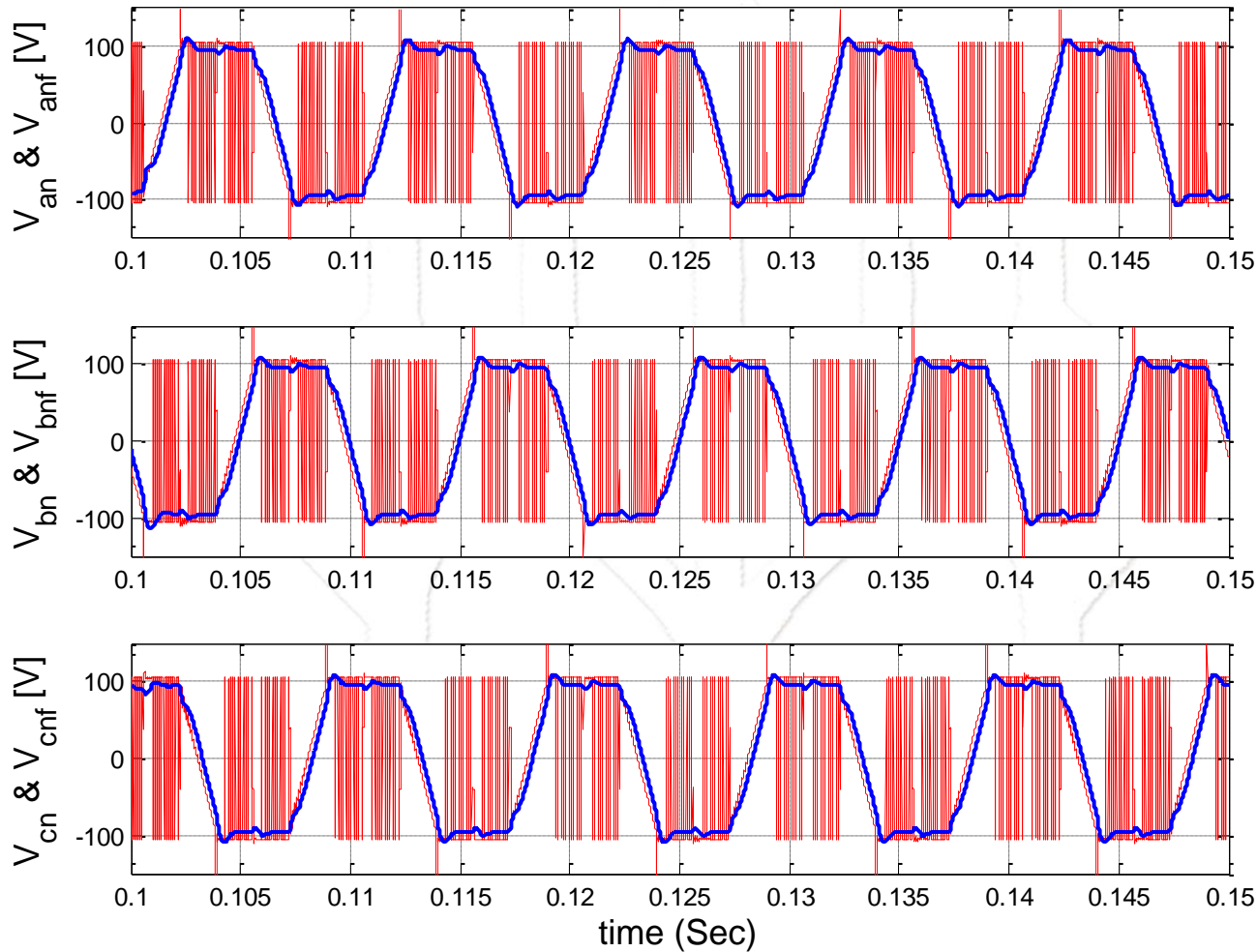


دانشگاه کاشان

## □ شبیه سازی درایو BLDC با تنظیم جریان لینک dc

➤ نتایج شبیه سازی: شکل موج ولتاژ فازها

✓ ولتاژ فازها بصورت شکل موج PWM است که مقدار rms متوسط آن بصورت ذوزنقه ای است.







✓ همانطور که در شبیه سازیها مشاهده گردید، در موتور BLDC، گشتاور الکترومغناطیسی تولید شده توسط موتور کاملاً ثابت نمی باشد، که این مساله یکی از معایب موتور BLDC نسبت به موتور BLAC (یا PMSM) می باشد.

### ✓ سه منبع اصلی ایجاد ریل گشتاور در موتورهای BLDC:

**کموتاسیون جریان:** در موتور BLDC بدلیل تغذیه سوئیچینگ استاتور و وجود تاخیر ناشی از اندوکتانس های استاتور، در لحظات کموتاسیون (تغییر جریان بین فازها) اعوجاجاتی در جریان موتور و در نتیجه گشتاور الکترومغناطیسی بوجود می پیوندد. همچنین استفاده از تکنیکهای کنترل PWM نیز منجر به ایجاد نوسانات فرکانس بالای گشتاور می گردد.

**گشتاور رلوکتانسی:** ناشی از برهم کنش نیروهای الکترومغناطیسی (mmf) استاتور با تغییرات زاویه ای رلوکتانس مغناطیسی روتور می باشد. ماشینهای از نوع مغناطیس سطحی گشتاور رلوکتانسی قابل ملاحظه ای تولید نمی کنند.

**گشتاور کاکینگ یا دندانه ای (Cogging Torque):** ناشی از برهم کنش شار مغناطیسی روتور و تغییرات رلوکتانس مغناطیسی استاتور می باشد. گشتاور ناشی از این اثر که بصورت نوساناتی بر روی گشتاور متوسط الکترومغناطیسی تولید شده ظاهر می شود به گشتاور Cogging نامگذاری می شود که البته به آن گشتاور دندانه ای نیز می گویند. میدان تحریک استاتور اثری بر تولید این گشتاور ندارد.



✓ روشهای کاهش ریپل گشتاور به دو دسته عمده زیر تقسیم بندی می شوند:

۱- روشهای بر مبنای طراحی بهینه موتور

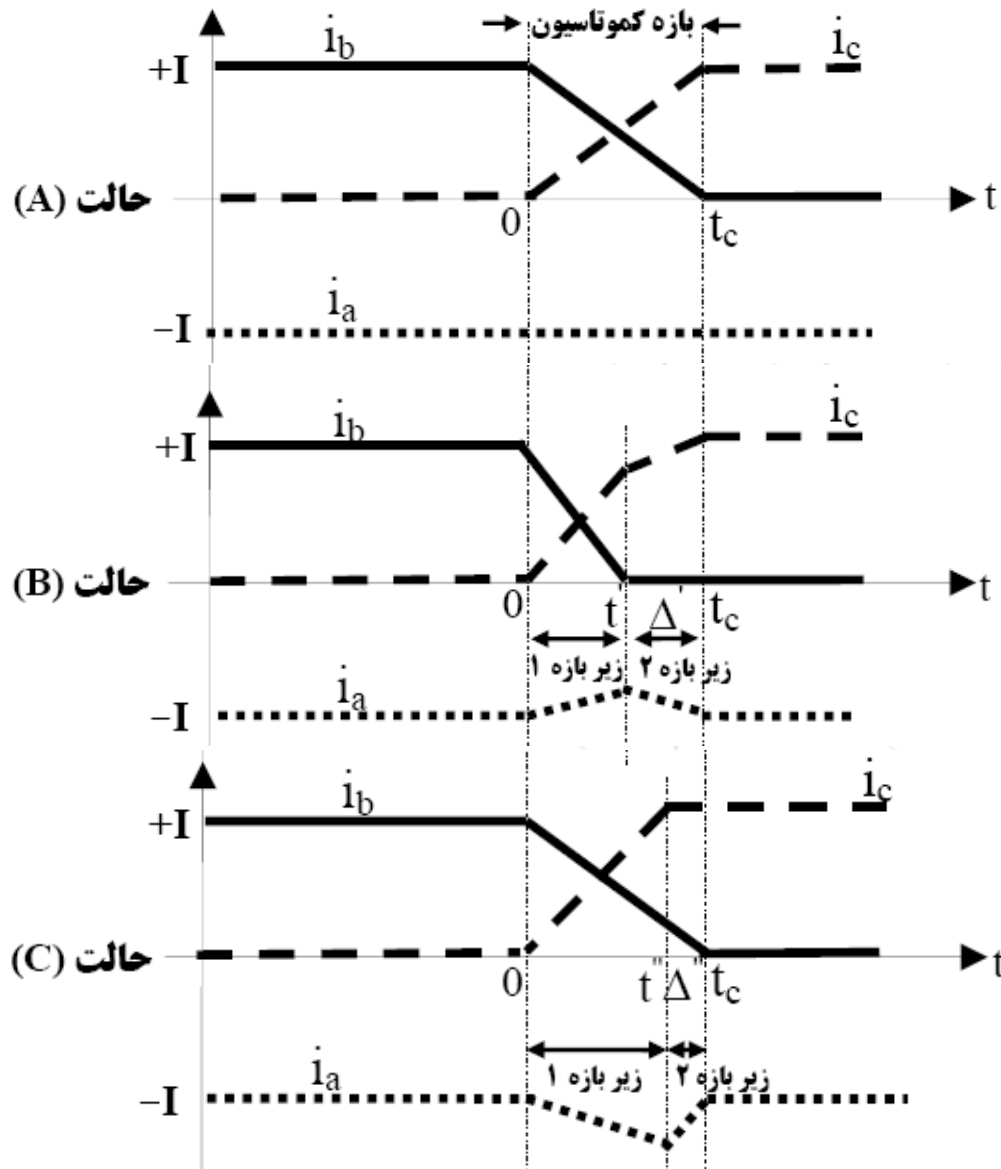
۲- روشهای بر مبنای طراحی سیستم کنترل (تغذیه) مناسب موتور

❖ کاهش ریپل گشتاور بر مبنای طراحی بهینه موتور:

✓ از روشهای موثر کاهش ریپل گشتاور موتور BLDC، طراحی بهینه دو بخش استاتور و روتور است به نحوی که رفتار موتور به حالت ایده آل نزدیک تر باشد.

✓ در طراحی استاتور استفاده از سیم بندی با شیار بسته باعث کاهش قابل ملاحظه گشتاور کاگینگ می شود. مورب نمودن شیارهای استاتور، تغییرات رلوکتانس را از دید روتور کاهش می دهد و لذا می توان با این روش گشتاور کاگینگ را حداقل نمود [۷۶]. همچنین با شکل دهی مناسب دندانه های استاتور می توان دامنه گشتاور کاگینگ را کاهش داده و فرکانس ریپل گشتاور را افزایش داد.

✓ با طراحی مناسب آهنربای دائم روتور نیز ریپل گشتاور قابل کاهش است. قوسی شکل بودن آهنربا تا حد زیاد سبب کاهش مقدار هارمونیک های ولتاژ ضدمحرکه گشته و تاثیری مستقیم بر شکل شار فاصله هوایی دارد. شیفیت دادن قطبها، جهت مغناطیسی، عرض و زاویه تورب آهنربای دائم نیز بر کاهش ریپل گشتاور موثرند.



✓ اگر جریان هر دو فاز دخیل در کموتاسیون، دقیقاً در طی زمان  $t_c$  ثانیه به مقادیر نهایی خود نرسند (کموتاسیون غیر ایده‌آل)، در این صورت ریپل گشتاور یا به صورت بالازدگی و یا پائین‌زدگی وجود خواهد داشت.

✓ حالت ایده‌آل (A) فقط در یک سرعت خاص اتفاق می‌افتد که این سرعت به پارامترهای موتور، آرایش اینورتر و مقدار ولتاژ باس DC اینورتر وابسته است. در حالت (A) تغییر جریان بین دو فاز  $b$  و  $c$  بطور مستقیم و از طریق سوئیچ‌ها انجام می‌شود و هیچ کدام از دیودهای هرزه‌گرد اینورتر جریان را هدایت نمی‌کنند.

✓ در سایر سرعت‌ها کموتاسیون جریان مطابق حالت (B) و (C) یا (C) است که در آن تغییر جریان از فاز  $b$  به فاز  $c$  مستقیماً از طریق سوئیچ‌ها انجام نمی‌شود بلکه در طی بازه کموتاسیون، جریان برای لحظاتی از یک یا چند دیود هرزه‌گرد اینورتر نیز عبور می‌نماید.

کموتاسیون جریان بین دو فاز  $b$  و  $c$  در شرایط کاری مختلف:  
(A) حالت ایده‌آل (B) سرعت بالا (C) سرعت پائین

با انجام محاسبات می توان نشان داد که مقدار ریپل گشتاور و زمان کموتاسیون در هر حالت از روابط زیر بدست می آیند:

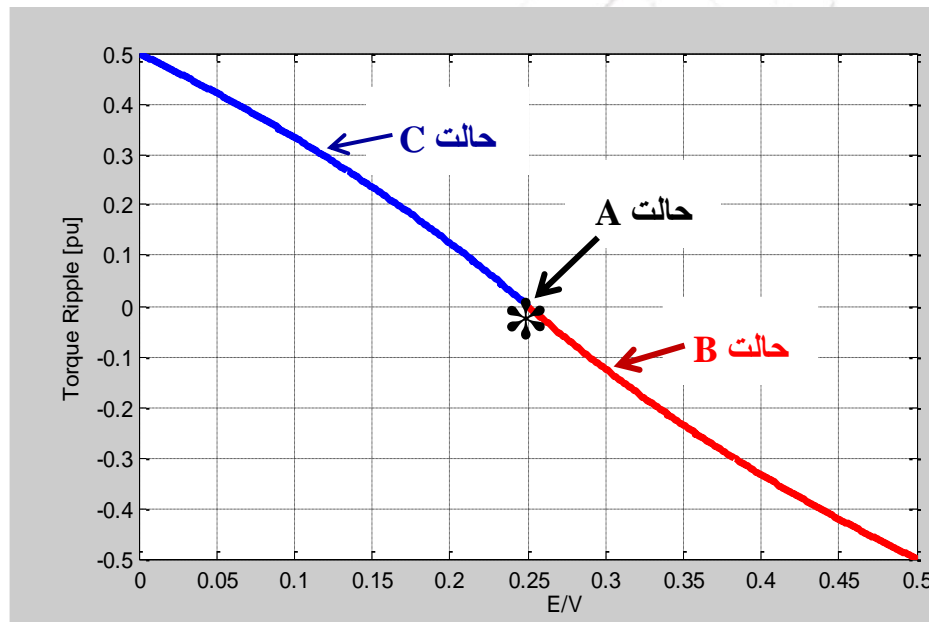
$$\text{Case A (V = 4E): } \Delta T = 0 \text{ (pu), } t_c = \frac{LI}{2E} \quad (1)$$

$$\text{Case B (V < 4E): } \Delta T = \frac{V - 4E}{2(V - E)} \text{ (pu), } t_c = \frac{LI}{V - 2E} \quad (2)$$

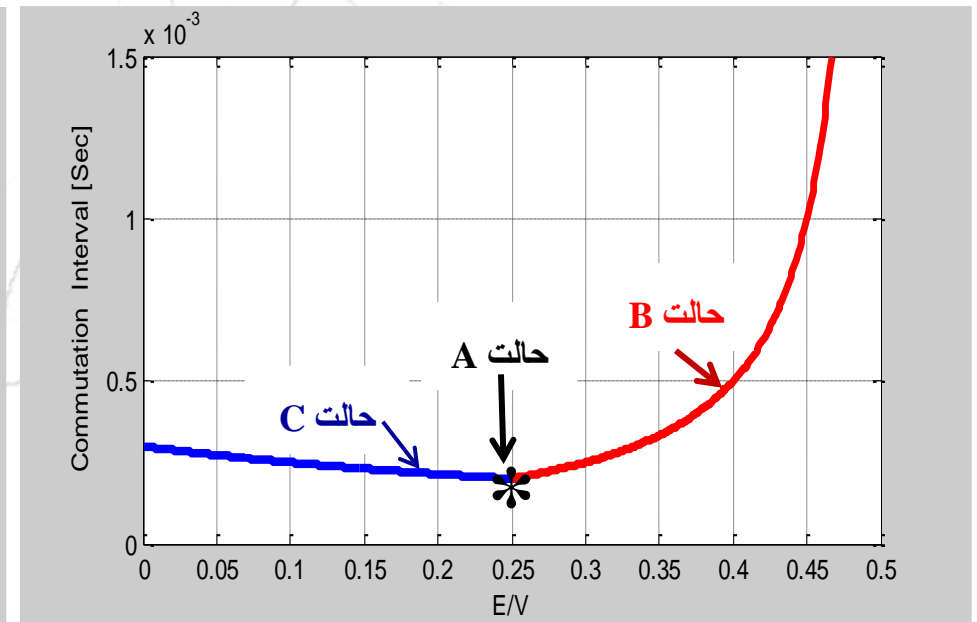
$$\text{Case C (V > 4E): } \Delta T = \frac{V - 4E}{V + 2E} \text{ (pu), } t_c = \frac{3LI}{V + 2E} \quad (3)$$

نمودار تغییرات این دو کمیت بر حسب سرعت و یا نسبت  $E/V$  نیز مطابق شکل‌های زیر هستند:

نقطه  $V=2E$  (یا  $E/V = 0.5$ )، نقطه حدی است که کنترل جریان در اینورتور شش سوئیچ امکانپذیر است.



(الف) تغییرات ریپل گشتاور بر حسب نسبت  $E/V$



(ب) تغییرات زمان بازه کموتاسیون بر حسب نسبت  $E/V$



## کاهش ریپل گشتاور در موتور BLDC □

➤ روشهای بر مبنای کنترل (تغذیه) مناسب موتور

### ❖ انواع روشها:

۱- شکل دهی جریان و کنترل مولفه های هارمونیکی جریان

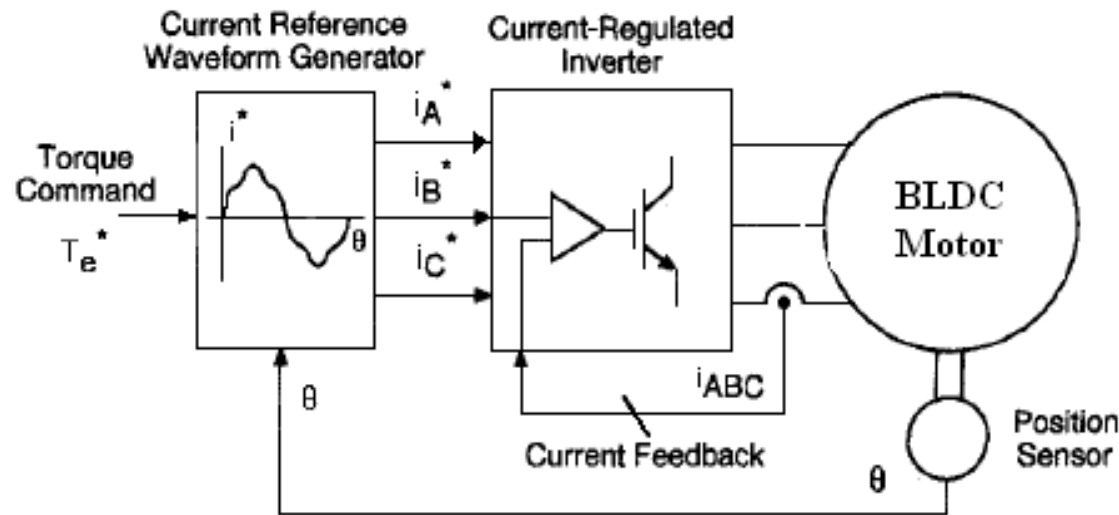
۲- کنترل مستقل جریان سه فاز

۴- کنترل زاویه پیشفازی

۳- کنترل مستقیم گشتاور و استفاده از روئیتگرها

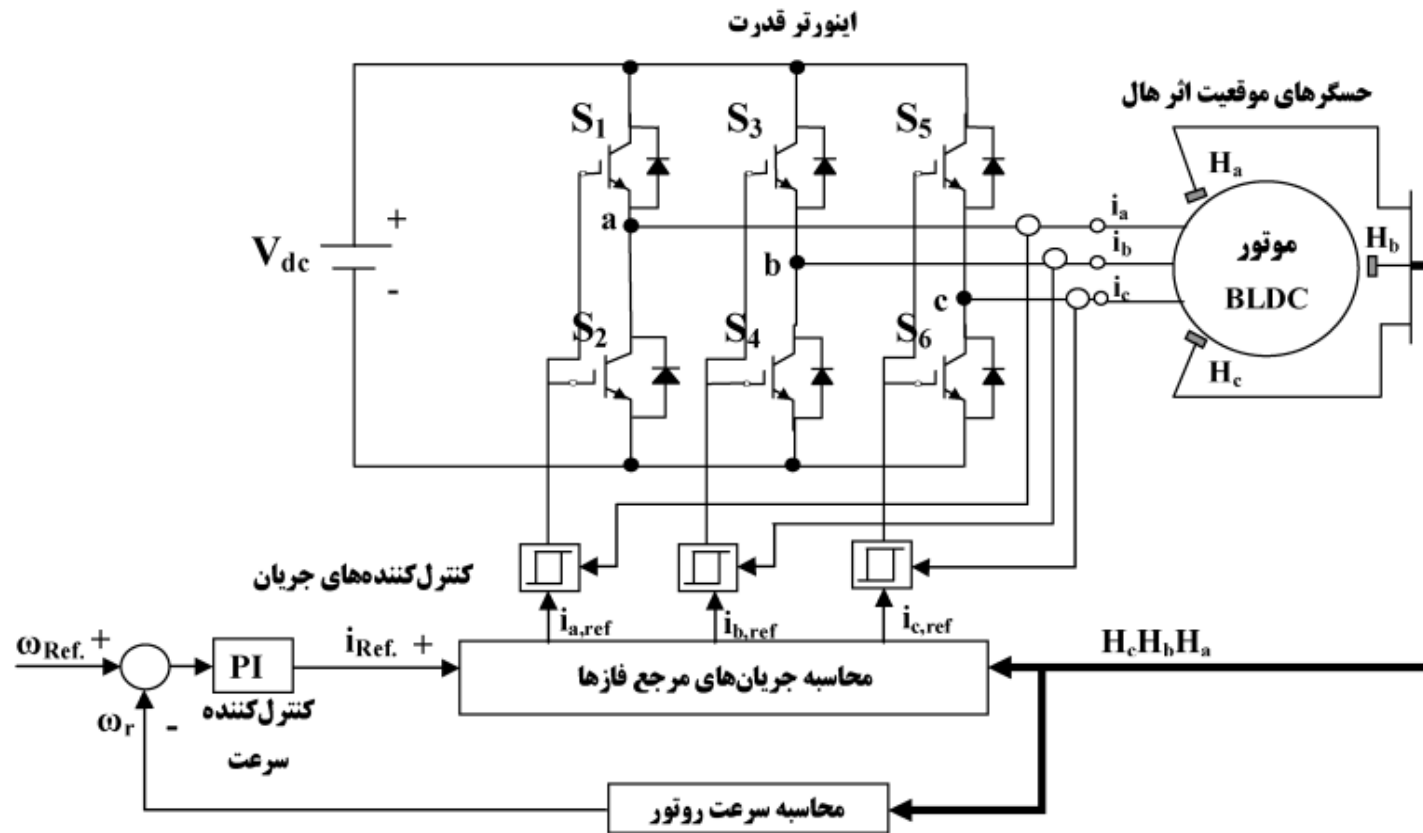
## ۱- شکل دهی جریان و کنترل مولفه های هارمونیکي جریان

ایده این دسته روش ها بر مبنای شکل دهی جریان و یا کنترل مولفه های هارمونیکي برای کاهش ریپل جریان و در نتیجه ریپل گشتاور استوار است. در این روش ها اطلاعات کافی درباره مشخصات موتور شامل گشتاور کائینگ، جریان فازها و موقعیت روتور مورد نیاز است.



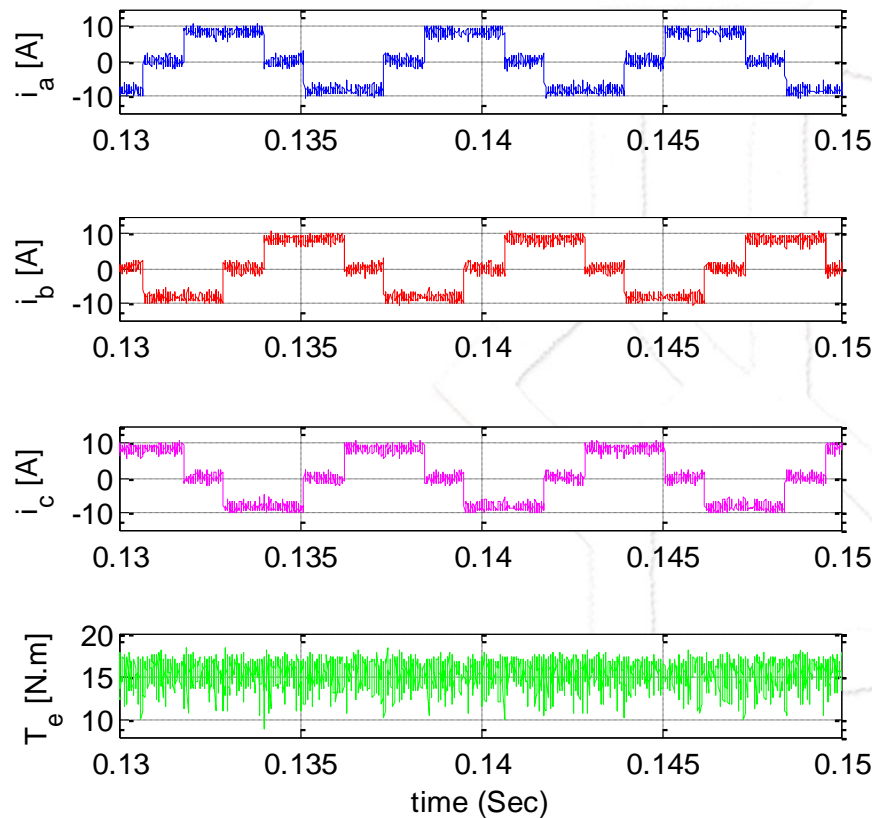
بلوک دیاگرام عمومی روش شکل دهی جریان برای کاهش یا حذف ریپل گشتاور موتور BLDC

- ✓ این روش به لحاظ پیاده سازی، ساده ترین روش بهبود ریپل گشتاور ناشی از کموتاسیون است.
- ✓ در این روش بجای کنترل جریان لینک dc، از سه کنترلر مستقل جریان و سه (دو) حسگر جریان استفاده می شود.
- ✓ در نتیجه اثر عملکرد دیوده های هرزه گرد خشی و شکل موج جریانها به حالت ایده آل نزدیکتر می شود.

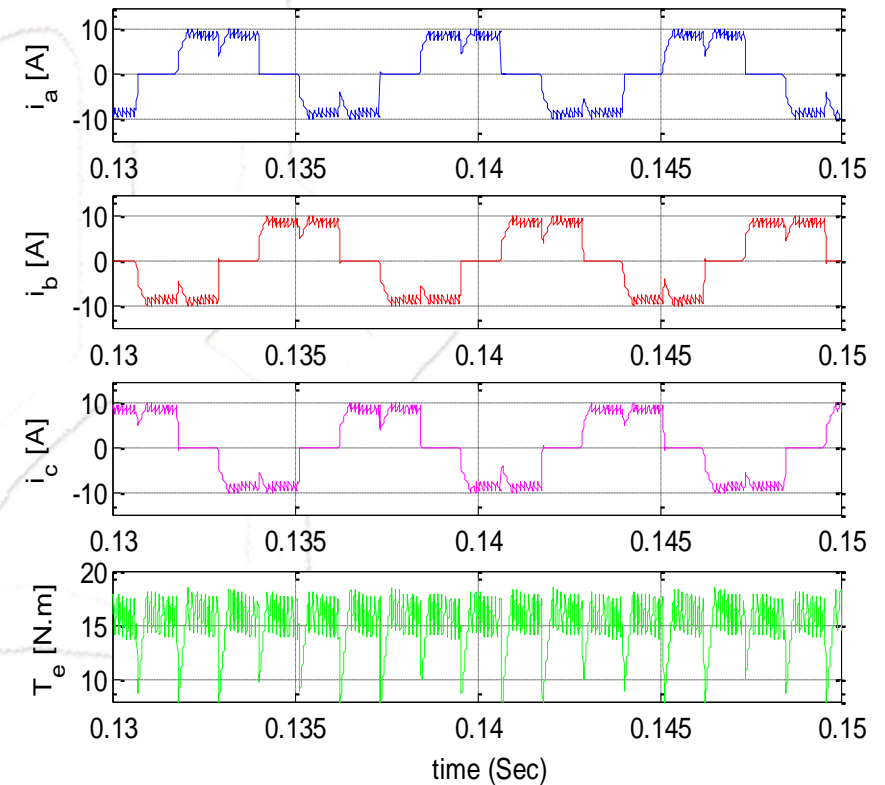


درایو موتور BLDC با تنظیم مستقل جریان سه فاز

- ✓ همانطور که در شکل زیر مشاهده می گردد با تنظیم مستقل جریان سه فاز، شکل موج جریانهای به مربعی نزدیکتر می شوند.
- ✓ در نتیجه ریپل گشتاور، کاهش یافته است.



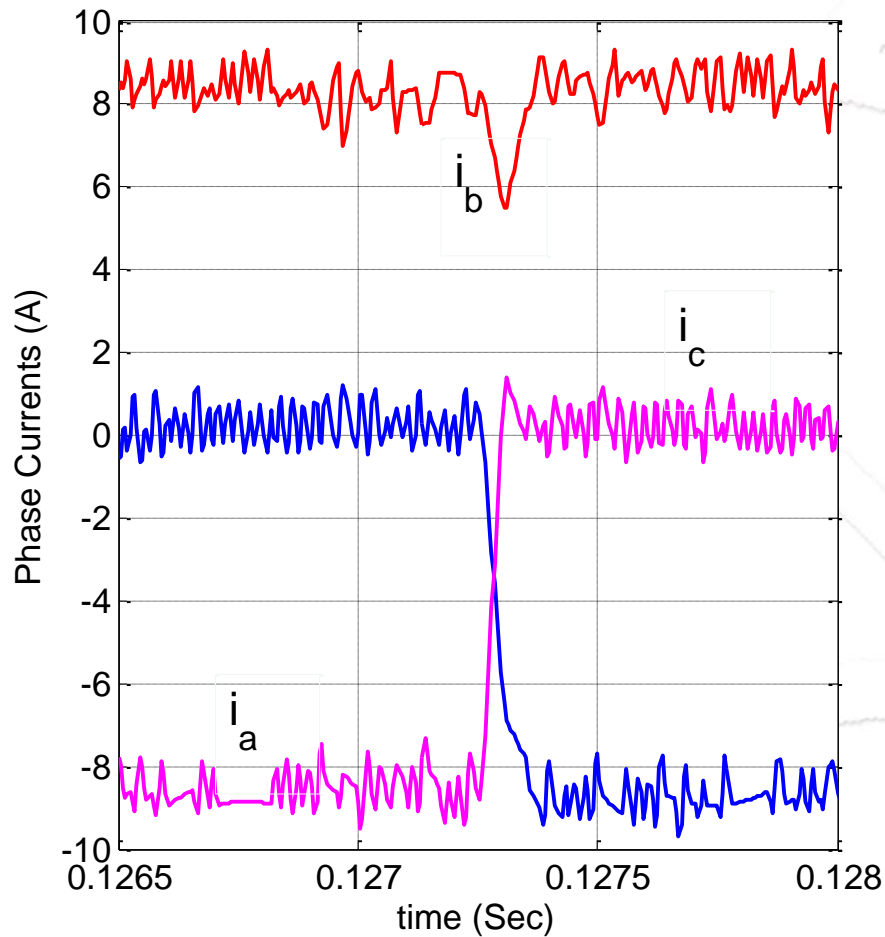
(ب) جریان فازها در روش کنترل جریان سه فاز



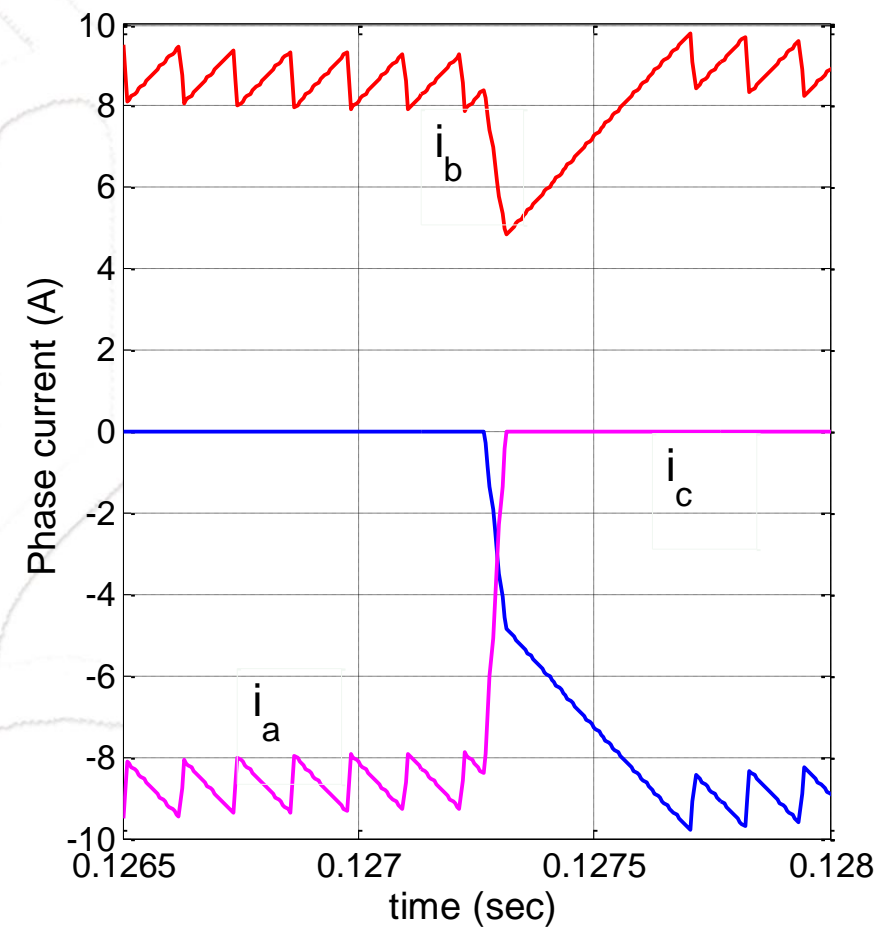
(الف) جریان فازها در روش کنترل جریان لینک dc



- ✓ مطابق شکل زیر، ریپل جریان در بازه کموتاسیون کاهش یافته است.
- ✓ اما از طرفی، حتی فاز خاموش در بازه کموتاسیون حول مقدار صفرش تنظیم می شود که منجر به افزایش تلفات سوئیچینگ می گردد.
- ✓ این روش در سرعتهای بالا نمود بیشتری دارد و کیفیت گشتاور را بهبود بیشتری می بخشد.



(ب) جریان فازها در روش کنترل جریان سه فاز



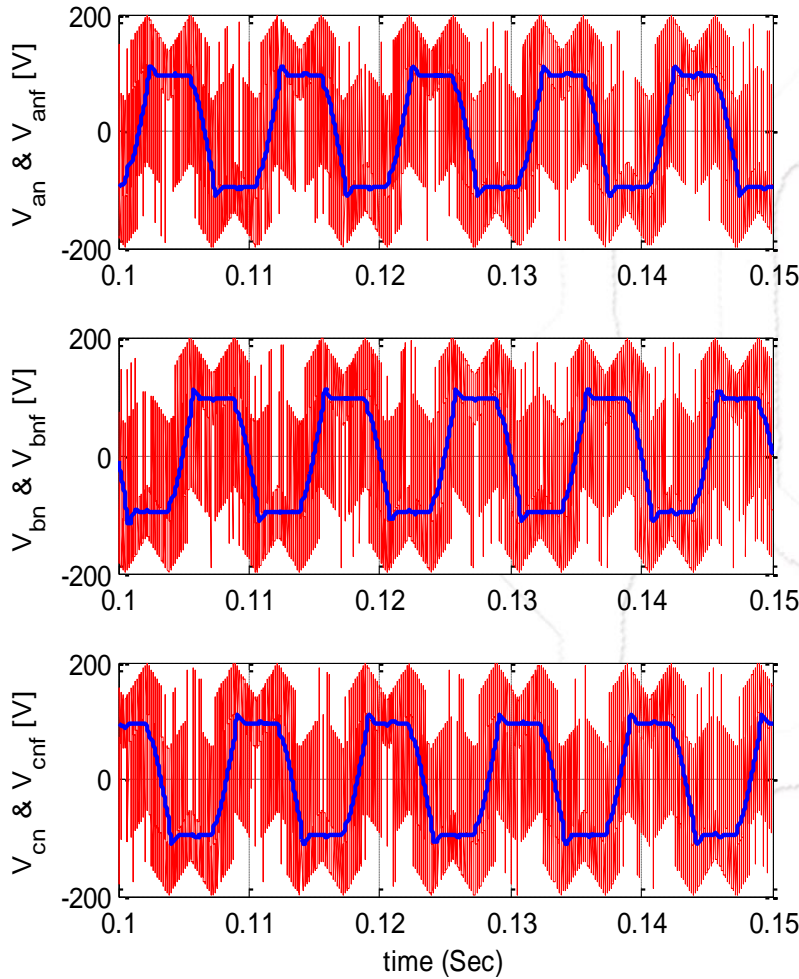
(الف) جریان فازها در روش کنترل جریان لینک dc



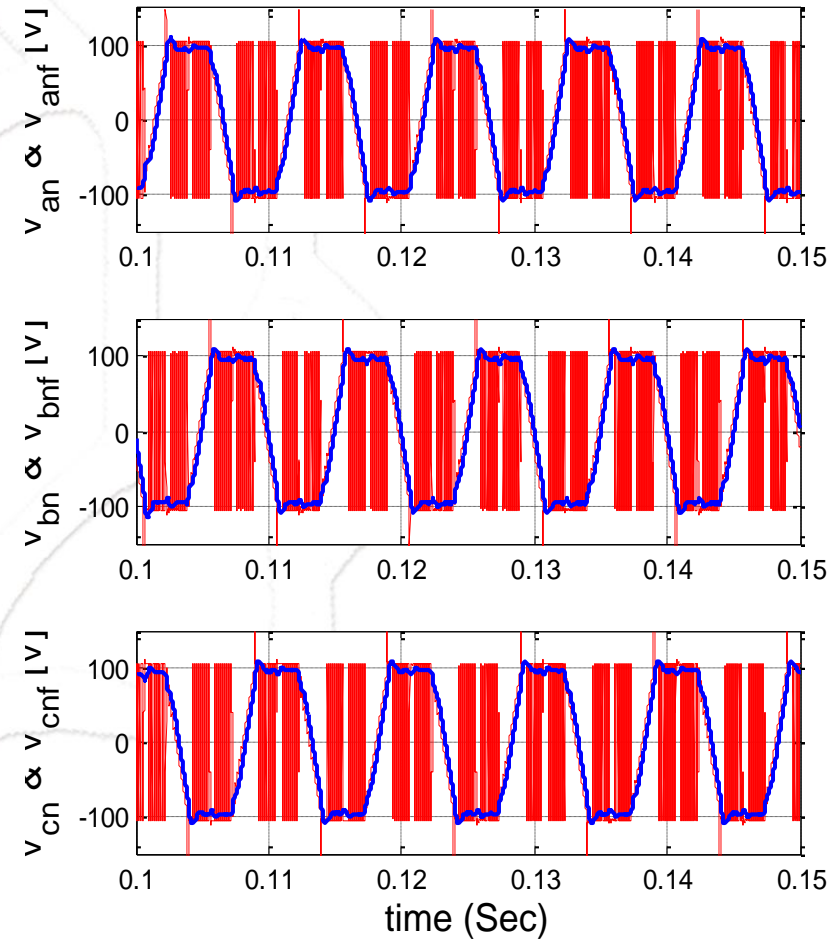
دانشگاه کاشان

# □ کنترل مستقل جریان سه فاز

➤ نتایج شبیه سازی: شکل موج ولتاژ فازها

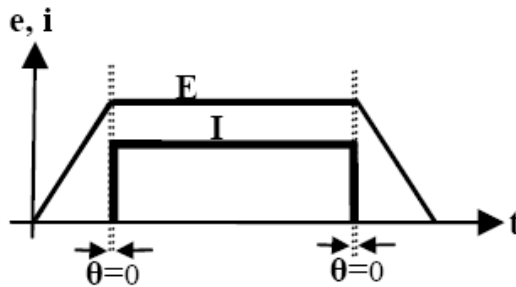


(ب) ولتاژ فازها در روش کنترل جریان سه فاز

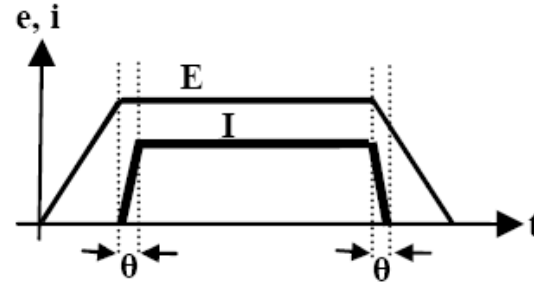


(الف) ولتاژ فازها در روش کنترل جریان لینک dc

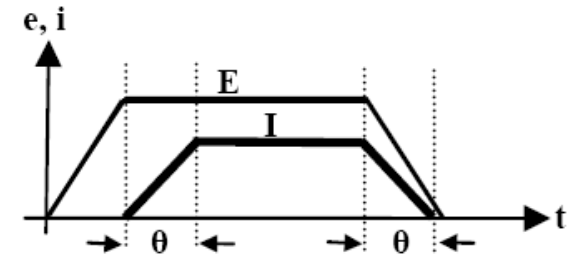
در این روش، ایجاد جریان در یک فاز کمی زودتر از موقع معمول آن انجام می شود.



الف- حالت ایده آل



ب- حالت واقعی و در محدوده زیر سرعت مبنا

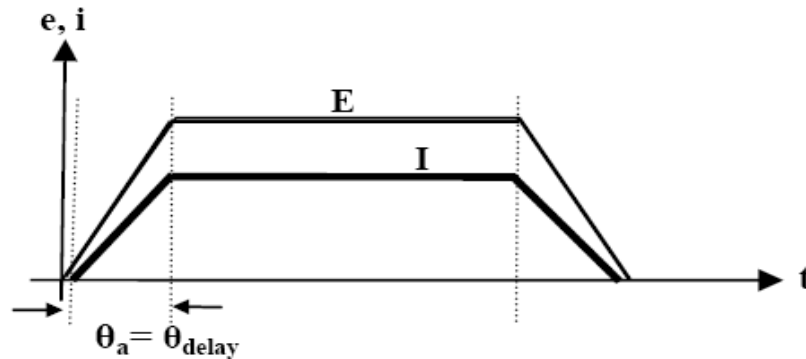


ج- حالت واقعی و در محدوده بالای سرعت مبنا

شکل موجهای ولتاژ ضد محرکه و جریان استاتور موتور BLDC در شرایط کاری مختلف

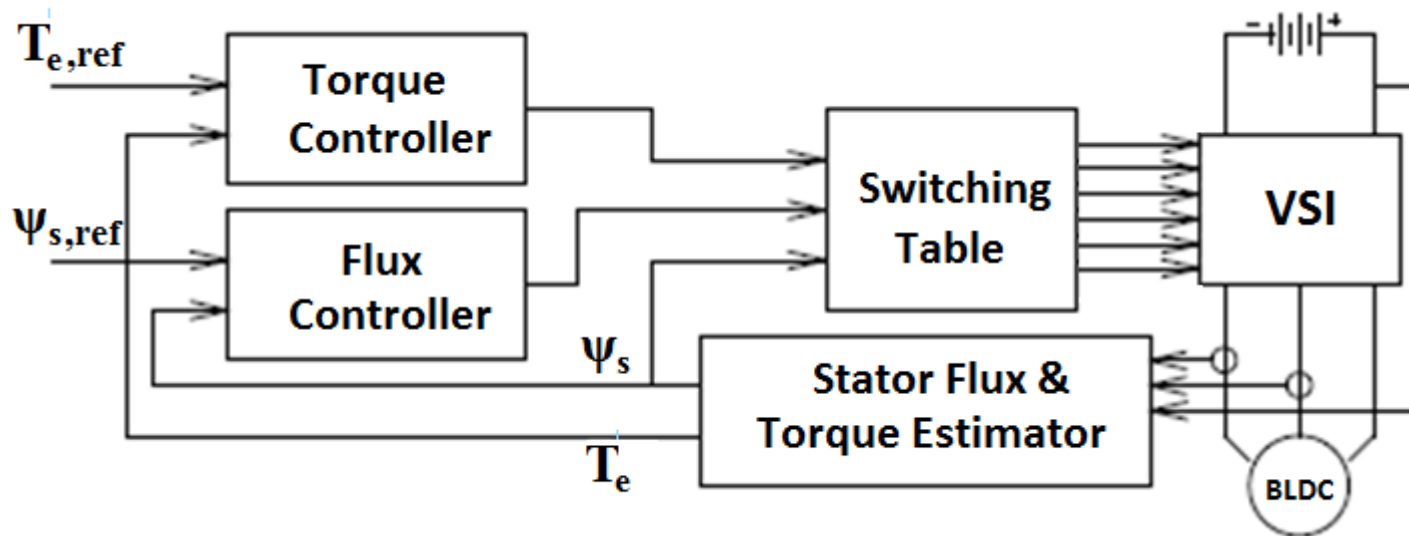
✓ در این روش می توان با پیش فاز نمودن جریان فاز نسبت به ولتاژ ضد محرکه متناظر به اندازه  $\theta_a$ ، تاخیر فاز بین جریان و ولتاژ

ضد محرکه را کم نموده و لذا ریپل گشتاور را کاهش داد.



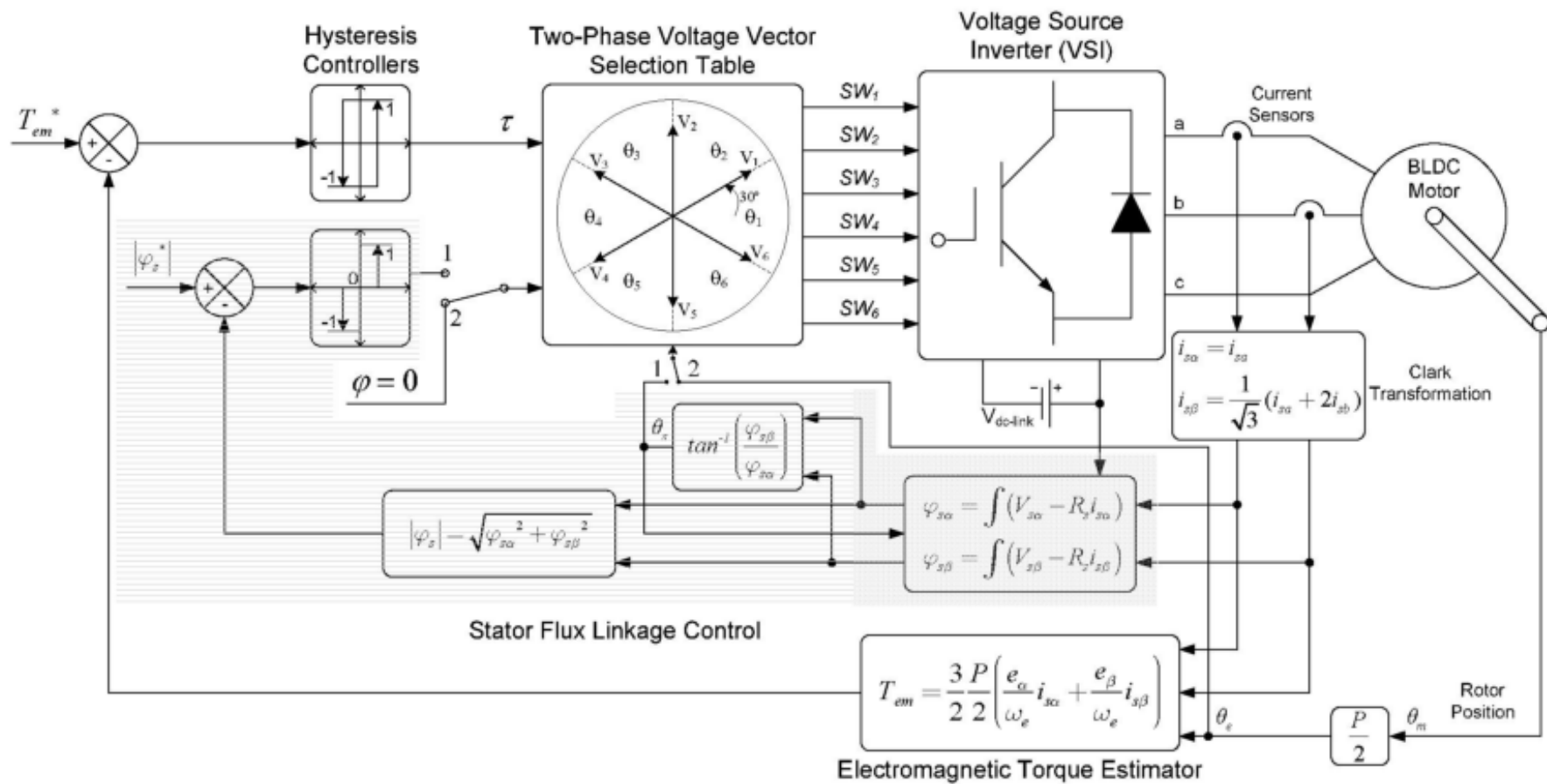
✓ این روش کنترل زاویه پیش فازی نام دارد و اغلب در ناحیه های کاری سرعت بالا به کار گرفته می شود.

- ✓ این روش بر مبنای کنترل مستقیم گشتاور (و شار) موتور بجای کنترل جریان استوار است.
- ✓ در این روش هیچ حلقه کنترل جریانی وجود ندارد و بجای آن حلقه های کنترل گشتاور و شار وجود دارد.
- ✓ برای این منظور ابتدا مقادیر گشتاور و شار تخمین (و یا اندازه گیری) می شوند و بر مبنای خطای آنها مستقیماً به اینورتر سه فاز فرمان داده می شود.
- ✓ در روش DTC، از استراتژی سوئیچینگ مدولاسیون بردار فضایی یا SVM (یا SV-PWM) استفاده می شود.



بلوک دیاگرام مفهومی روش کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC

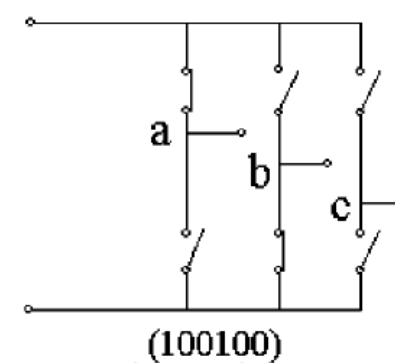
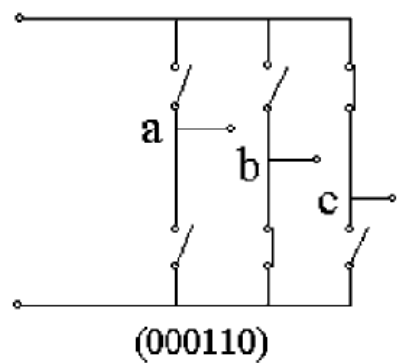
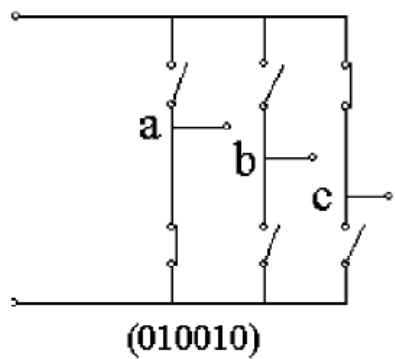
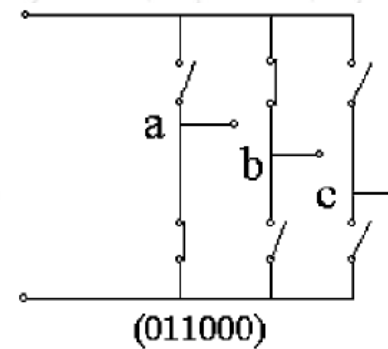
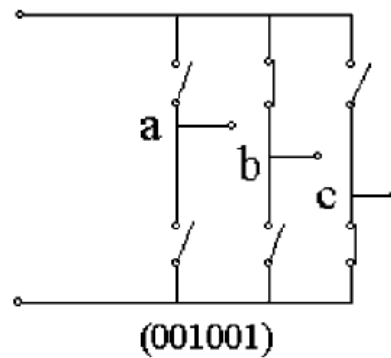
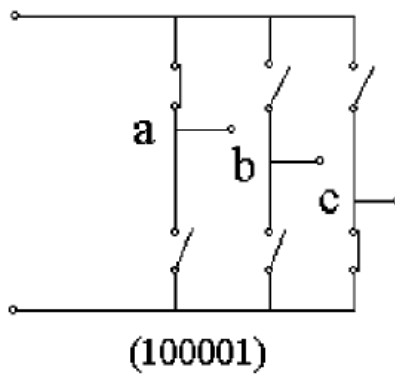
- ✓ یکی از مزایای مهم روش DTC، آنست که هر دو کنترل کننده شار و گشتاور می توانند از نوع هیستریزس باشند.
- ✓ در کنترل موتورهای BLDC حلقه کنترل شار می تواند وجود نداشته باشد و فقط به حلقه کنترل گشتاور اکتفا نمود.
- ✓ توجه بفرمایید منظور از  $\psi_s$  یا  $\phi_s$  یا  $\lambda_s$  در بلوک دیاگرام هیا روابط ارائه شده در بخش DTC همان شار پیوندی استاتور است.



بلوک دیاگرام کامل سیستم درایو کنترل گشتاور موتور BLDC به روش کنترل مستقیم گشتاور



- ✓ در کنترل موتورهای BLDC، با توجه به شکل ذوزنقه ای ولتاژ ضدمحرکه فازها، جهت کاهش ریبیل گشتاور، جریان شبه مربعی در هر لحظه از زمان فقط از دو فاز عبور می کند. یعنی یک سوئیچ از نیمه بالایی اینورتر و یک سوئیچ از نیمه پائینی اینورتر.
- ✓ در مجموع ۶ حالت هدایت فعال بصورت زیر وجود خواهد داشت:
- ✓ حالتی که تمامی سوئیچها باز بمانند (000000) را حالت غیر فعال گویند.



شش حالت سوئیچ ها در کنترل موتور BLDC به هدایت جریان در دو فاز

متناظر با هر حالت هدایت سوئیچینگ می توان فازور بردار فضایی ولتاژ استاتور را به صورت زیر تعریف نمود:

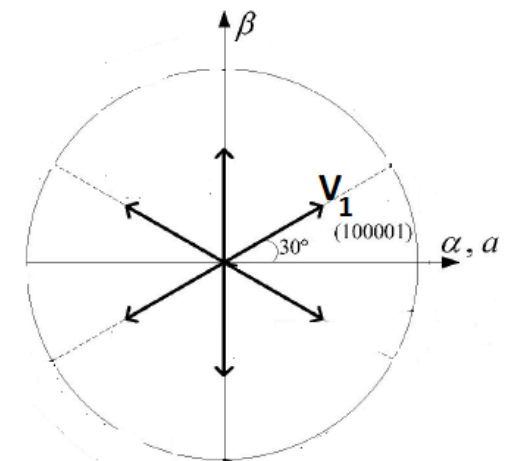
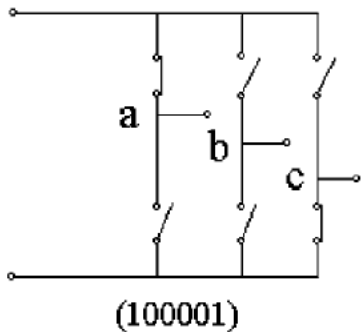
$$\vec{V}_s = \frac{2V_{dc}}{3} \left( S_a + e^{j\frac{2\pi}{3}} \times S_b + e^{j\frac{4\pi}{3}} \times S_c \right) \quad (4)$$

✓ در رابطه فوق حالت سوئیچینگ مربوط به سوئیچهای فازهای a و b و c است که می توانند اعداد 1، -1 و صفر را اختیار کند.

✓ برای مثال اگر سوئیچ بالایی مربوط به فاز a وصل باشد،  $S_a$  برابر 1 در نظر گرفته می شود و اگر سوئیچ پایینی مربوط به فاز a وصل باشد  $S_a$  برابر -1 و اگر هیچکدام از دو سوئیچ متصل به فاز a وصل نباشند  $S_a$  برابر صفر در نظر گرفته می شود.

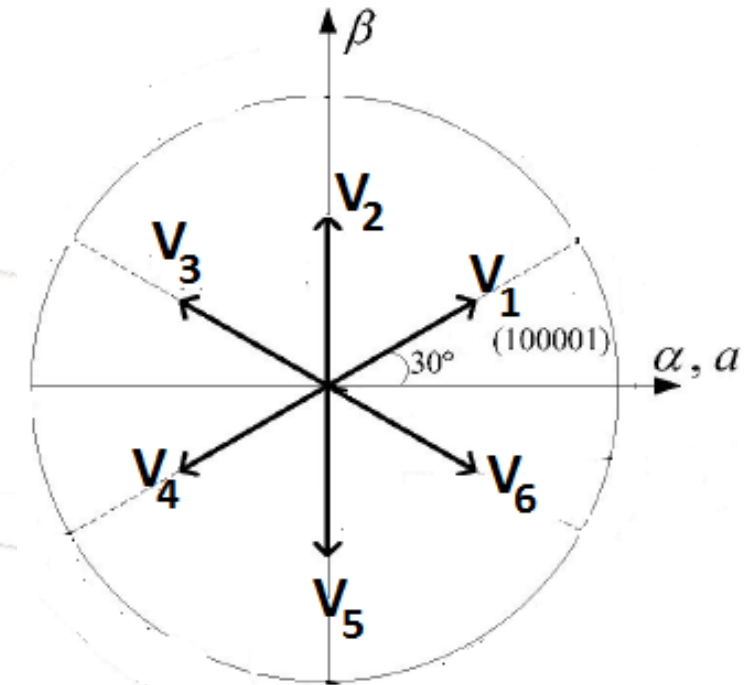
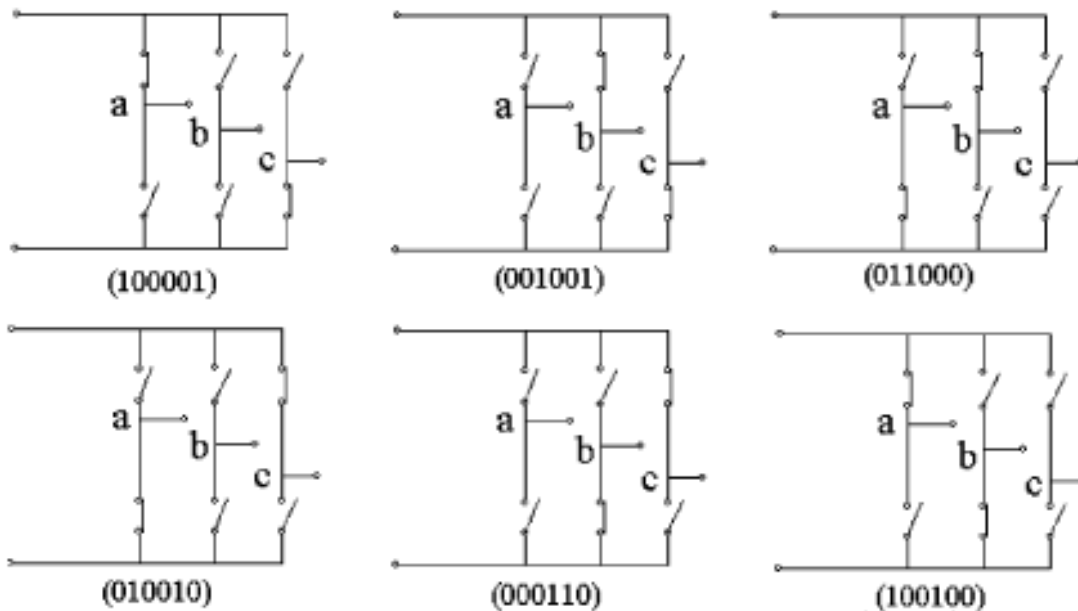
✓ با توجه به قراردادهای فوق برای حالت سوئیچینگ مطابق شکل زیر (100001)، بردار فضایی ولتاژ استاتور که نامش را  $V_1$  می گذاریم، بصورت زیر می شود:

$$\begin{aligned} \vec{V}_1 &= \frac{2V_{dc}}{3} \left( 1 + e^{j\frac{2\pi}{3}} \times 0 + e^{j\frac{4\pi}{3}} \times (-1) \right) = \frac{2}{3} V_{dc} \left( \frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \\ &= \frac{2\sqrt{3}}{3} V_{dc} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} \right) \\ &= \frac{2\sqrt{3}}{3} V_{dc} e^{j30^\circ} \end{aligned}$$





- ✓ به روش مشابه، متناظر با هر حالت سوئیچینگ، یک بردار فضایی ولتاژ وجود خواهد داشت و در مجموع ۶ بردار ولتاژ متناظر با هر حالت سوئیچینگ وجود دارند.
- ✓ این شش بردار ولتاژ، بازه ۳۶۰ درجه را به ۶ ناحیه ۶۰ درجه ای تقسیم می کنند.
- ✓ حالت متناظر با قطع بودن ۶ کلید متناظر با بردار ولتاژ صفر است که بر مبدا واقع است.



(الف) شش حالت سوئیچ ها در کنترل موتور BLDC به هدایت جریان در دو فاز

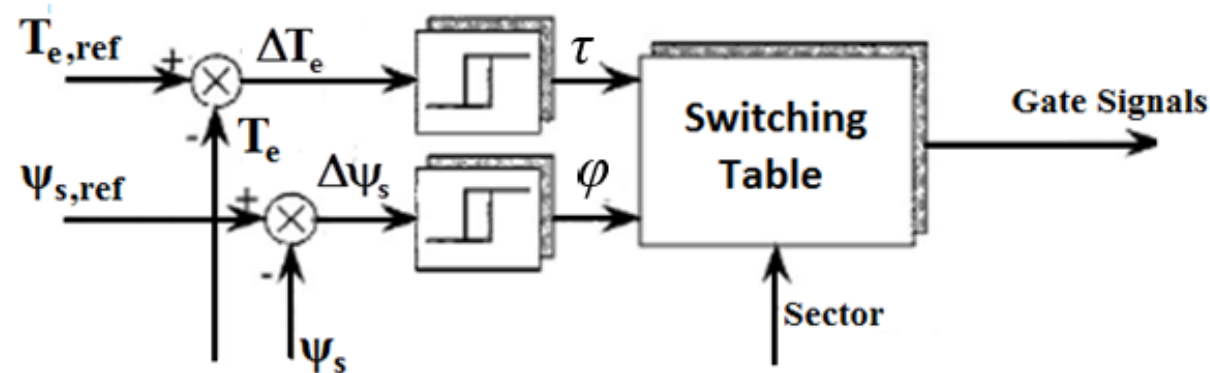
(ب) شش بردار ولتاژ متناظر با هر حالت سوئیچینگ

✓ اشاره گردید که در روش DTC شار و گشتاور مستقیماً کنترل می شوند.

✓ به عبارت دیگر از خطای شار و گشتاور ایجاد شده توسط مقایسه گرهای شار و گشتاور مستقیماً برای سوئیچینگ اینورتر SVM استفاده می شود.

$$\Delta T_e = T_{e,ref} - T_e \quad (5)$$

$$\Delta \psi_s = \psi_{s,ref} - \psi_s$$



✓ کنترلرهای هیستریزیس، علامت تغییرات شار و گشتاور، یعنی نیاز موتور به افزایش شار/گشتاور و یا کاهش آنها را در هر لحظه زمانی نشان می دهند.

✓ در بلوک جدول سوئیچینگ، بر حسب اینکه افزایش/کاهش مقادیر گشتاور/شار مورد نیاز باشد، سوئیچینگ مناسب انجام گیرد و به عبارتی کلیدهای مناسب وصل و یا قطع می گردند.

✓ در ادامه، منطق کلیدزنی در اینورتر و ارتباط آرایش کلیدزنی با افزایش/کاهش مقادیر گشتاور/شار توضیح داده می شوند.

✓ رابطه کلی گشتاور در ماشینهای الکتریکی به قرار زیر است:

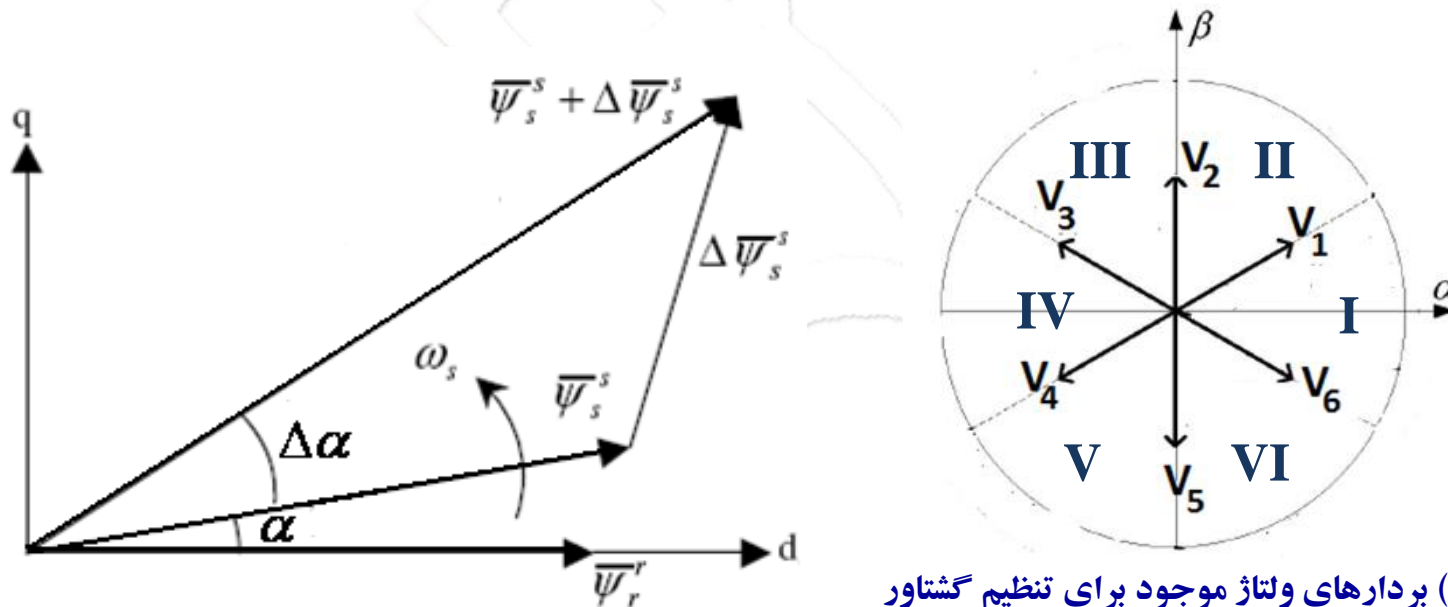
$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \left| \bar{\psi}_s^s \right| \left| \bar{\psi}_r^s \right| \sin \alpha \quad (6)$$

✓ با توجه به اینکه شار روتور توسط آهنربای ثابت ایجاد می شود، می توان دامنه آنرا ثابت در نظر گرفت.

✓ همچنین با استفاده از کنترلر شار می توان دامنه شار استاتور یعنی  $\psi_s$  را در مقدار دلخواه آن ثابت نگه داشت.

✓ در اینصورت می توان گشتاور را با تغییر زاویه بین شارهای استاتور و روتور یعنی زاویه  $\alpha$  تغییر داد.

✓ مطابق شکل زیر، برخی از بردارهای ولتاژ، زاویه  $\alpha$  را افزایش داده و لذا گشتاور را زیاد می کنند و برخی دیگر، زاویه  $\alpha$  و در نتیجه گشتاور را کاهش می دهند.

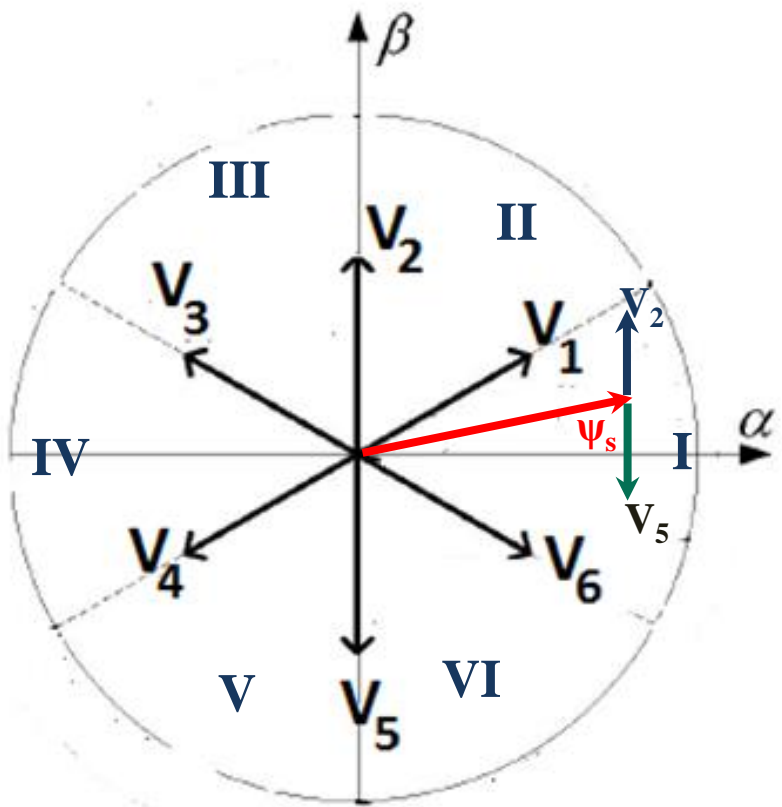


(ب) بردارهای ولتاژ موجود برای تنظیم گشتاور

(الف) افزایش گشتاور با افزایش شار استاتور

➤ چگونگی تغییر گشتاور با انتخاب بردار ولتاژ مناسب

✓ برای مثال در ناحیه I (از زاویه  $-30^\circ$  تا  $+30^\circ$  درجه، بردارهای ولتاژ  $V_1$  و  $V_2$  و  $V_3$  زاویه شار استاتور را (در جهت دایره مثلثاتی) افزایش می دهند و بردارهای ولتاژ  $V_4$  و  $V_5$  و  $V_6$  زاویه شار را کاهش می دهد.



تغییر زاویه شار در ناحیه I

✓ لذا برای هر سکتور با شماره  $k$  (از ۱ تا ۶) سه بردار  $V_k$  و  $V_{k+1}$  و  $V_{k+2}$  سبب افزایش گشتاور و سه بردار  $V_{k-1}$  و  $V_{k-2}$  و  $V_{k-3}$  سبب کاهش گشتاور می شوند.

✓ سؤال این است که برای افزایش (یا کاهش) گشتاور، از میان سه گزینه ممکن کدامیک از بردارها را انتخاب نمائیم؟

✓ برای پاسخ به سؤال فوق، باید ببینیم که کنترل کننده شار چه فرمانی صادر می کند.

✓ در موتورهای AC، تغییرات لحظه ایی بردار شار پیوندی استاتور توسط ولتاژ استاتور از رابطه زیر تبعیت می کند:

$$\frac{d\bar{\psi}_s}{dt} = \bar{V}_s - r_s \bar{i}_s \quad (7)$$

$$\frac{d\bar{\psi}_s}{dt} \cong \bar{V}_s \quad (8)$$

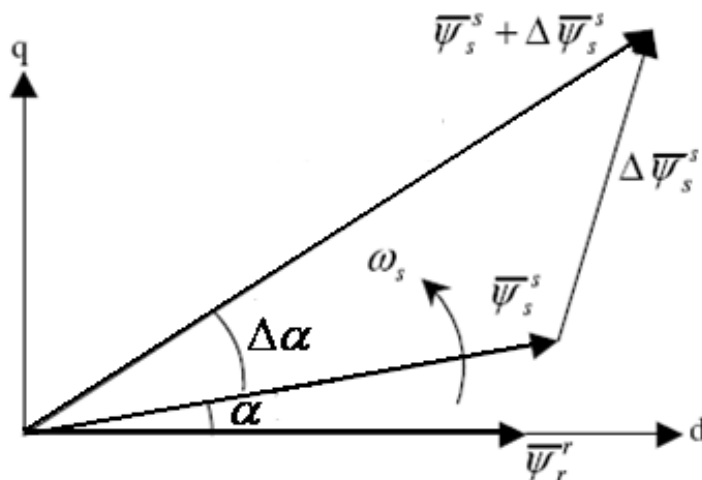
✓ با صرف نظر از افت ولتاژ اهمی استاتور خواهیم داشت:

✓ این رابطه بازگویی این مطلب است که با تغییر بردار ولتاژ خروجی اینورتر، می توان اندازه و جهت بردار شار استاتور را تغییر داد:

$$\Delta \bar{\psi}_s \cong \bar{V}_s \Delta t \quad (9)$$

✓ شکل مقابل بیان می دارد که برای تغییر دامنه و راستای شار استاتور، باید بردار  $\Delta \bar{\psi}_s$  به بردار شار استاتور  $\bar{\psi}_s$  اضافه گردد.

✓ برای ایجاد بردار  $\Delta \bar{\psi}_s$  مطابق رابطه فوق، باید از بردار  $V_s$  با راستای مناسب استفاده نمود.

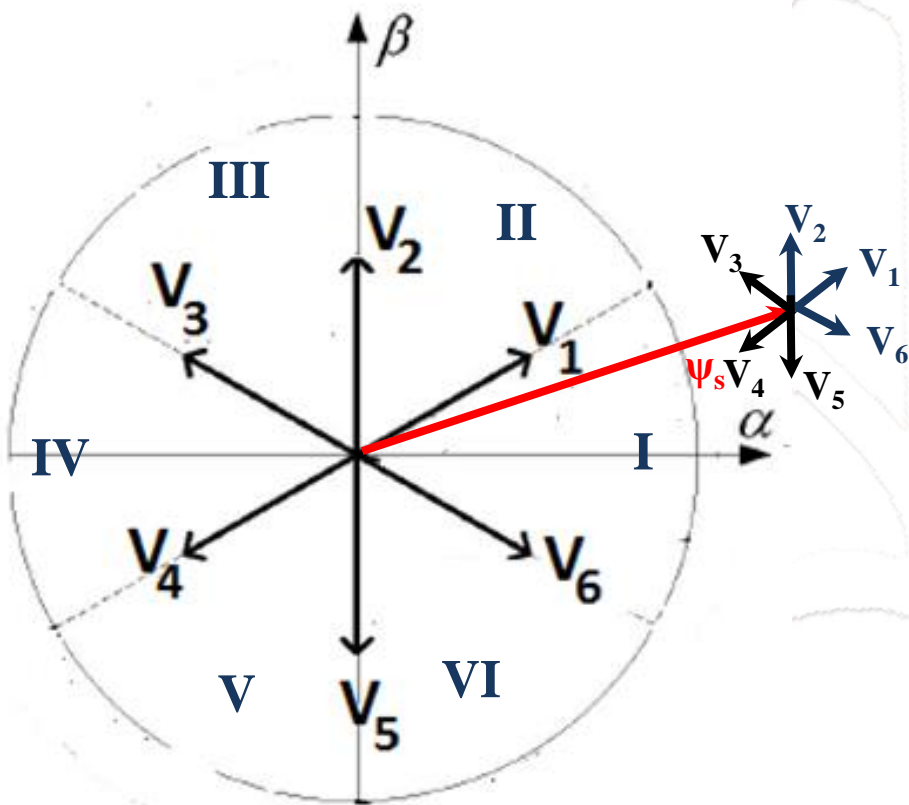


تغییر دامنه شار استاتور

➤ چگونگی تغییر شار با انتخاب بردار ولتاژ مناسب

✓ برای مثال و مطابق شکل زیر، در ناحیه I (از زاویه  $-30^\circ$  تا  $+30^\circ$  درجه، بردارهای ولتاژ  $V_1$  و  $V_2$  و  $V_6$  اندازه بردار شار استاتور  $(\psi_s)$  را افزایش می دهند و بردارهای ولتاژ  $V_3$  و  $V_4$  و  $V_5$  اندازه بردار شار را کاهش می دهند.

✓ لذا هر گاه، جهت بردار ولتاژ به جهت بیرون از دایره ای باشد که مرکز آن مبدا، و شعاع آن مقدار قبلی شار است، آن بردار ولتاژ سبب افزایش شار خواهد گردید و همینطور بالعکس.



تغییر دامنه شار استاتور در ناحیه I

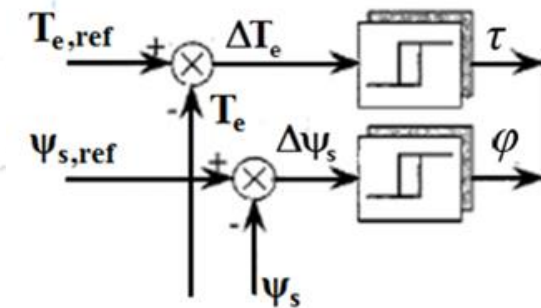
✓ لذا برای هر سکتور با شماره  $k$  ( $k$  از ۱ تا ۶) سه بردار  $V_k$  و  $V_{k+1}$  و  $V_{k-1}$  سبب افزایش دامنه شار استاتور و سه بردار  $V_{k+2}$  و  $V_{k+3}$  و  $V_{k-2}$  سبب کاهش دامنه بردار شار استاتور می شوند.

✓ سؤال این است که برای مثلاً افزایش شار، کدامیک از سه بردار  $V_k$  و  $V_{k+1}$  و  $V_{k-1}$  را انتخاب نمائیم؟

- ✓ اینکه در هر سکتور، کدام یک از بردارهای ولتاژ را انتخاب نمائیم بسته به این دارد که کنترل کننده های شار و گشتاور خروجی شان چه باشد؟ یعنی آیا گشتاور باید کم شود یا زیاد و یا شار باید کم شود یا زیاد.
- ✓ بسته به خروجی کنترلرهای شار و گشتاور چهار حالت متفاوت وجود خواهد داشت و لذا ما در هر سکتور فقط یک بردار ولتاژ می توانیم برای هر کدام از چهار حالت فوق انتخاب نمائیم.
- ✓ حالات فوق در یک جدول به نام جدول سوئیچینگ و به صورت زیر قابل جمع بندی هستند:

جدول سوئیچینگ مورد استفاده در کنترل موتور BLDC به روش DTC

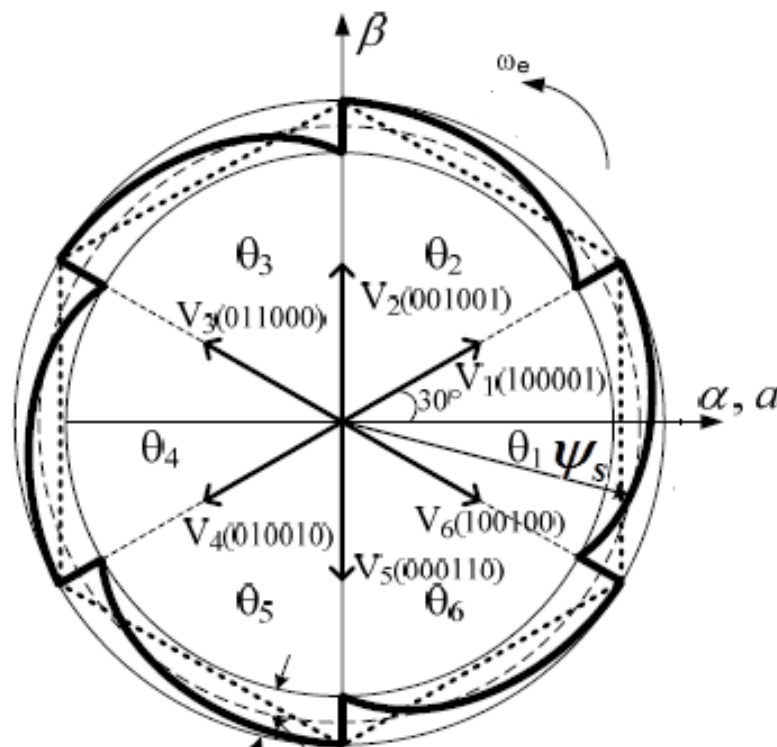
Torque $\tau$	Flux $\phi$	Sector					
		I	II	III	IV	V	VI
1	1	V <sub>1</sub> (100001)	V <sub>2</sub> (001001)	V <sub>3</sub> (011000)	V <sub>4</sub> (010010)	V <sub>5</sub> (000110)	V <sub>6</sub> (100100)
	0	V <sub>2</sub> (001001)	V <sub>3</sub> (011000)	V <sub>4</sub> (010010)	V <sub>5</sub> (000110)	V <sub>6</sub> (100100)	V <sub>1</sub> (100001)
	-1	V <sub>3</sub> (011000)	V <sub>4</sub> (010010)	V <sub>5</sub> (000110)	V <sub>6</sub> (100100)	V <sub>1</sub> (100001)	V <sub>2</sub> (001001)
-1	1	V <sub>1</sub> (100001)	V <sub>2</sub> (001001)	V <sub>3</sub> (011000)	V <sub>4</sub> (010010)	V <sub>5</sub> (000110)	V <sub>6</sub> (100100)
	0	V <sub>5</sub> (000110)	V <sub>6</sub> (100100)	V <sub>1</sub> (100001)	V <sub>2</sub> (001001)	V <sub>3</sub> (011000)	V <sub>4</sub> (010010)
	-1	V <sub>3</sub> (011000)	V <sub>4</sub> (010010)	V <sub>5</sub> (000110)	V <sub>6</sub> (100100)	V <sub>1</sub> (100001)	V <sub>2</sub> (001001)



خروجی کنترلرهای شار و گشتاور برای انتخاب بردار ولتاژ مناسب

- ✓ مشاهده می گردد که دامنه شار استاتور در هر 60 درجه (کموتاسیون جریان بین دو فاز) با یک پریودگی همراه است.
- ✓ علت این موضوع صفر شدن جریان یک فاز و عملکرد دیویدهای هرزه گرد است.
- ✓ لذا کنترل و تنظیم شار استاتور در روش DTC با هدایت دو فاز بسیار سخت است و در نتیجه بکارگیری کنترلر شار اثر چشمگیری روی عملکرد سیستم ندارد.

✓ البته بکارگیری کنترلر شار نیازمند دانستن مقدار دقیق شار بویژه در نقاط کموتاسیون است که تخمین آن کار بسیار سختی است

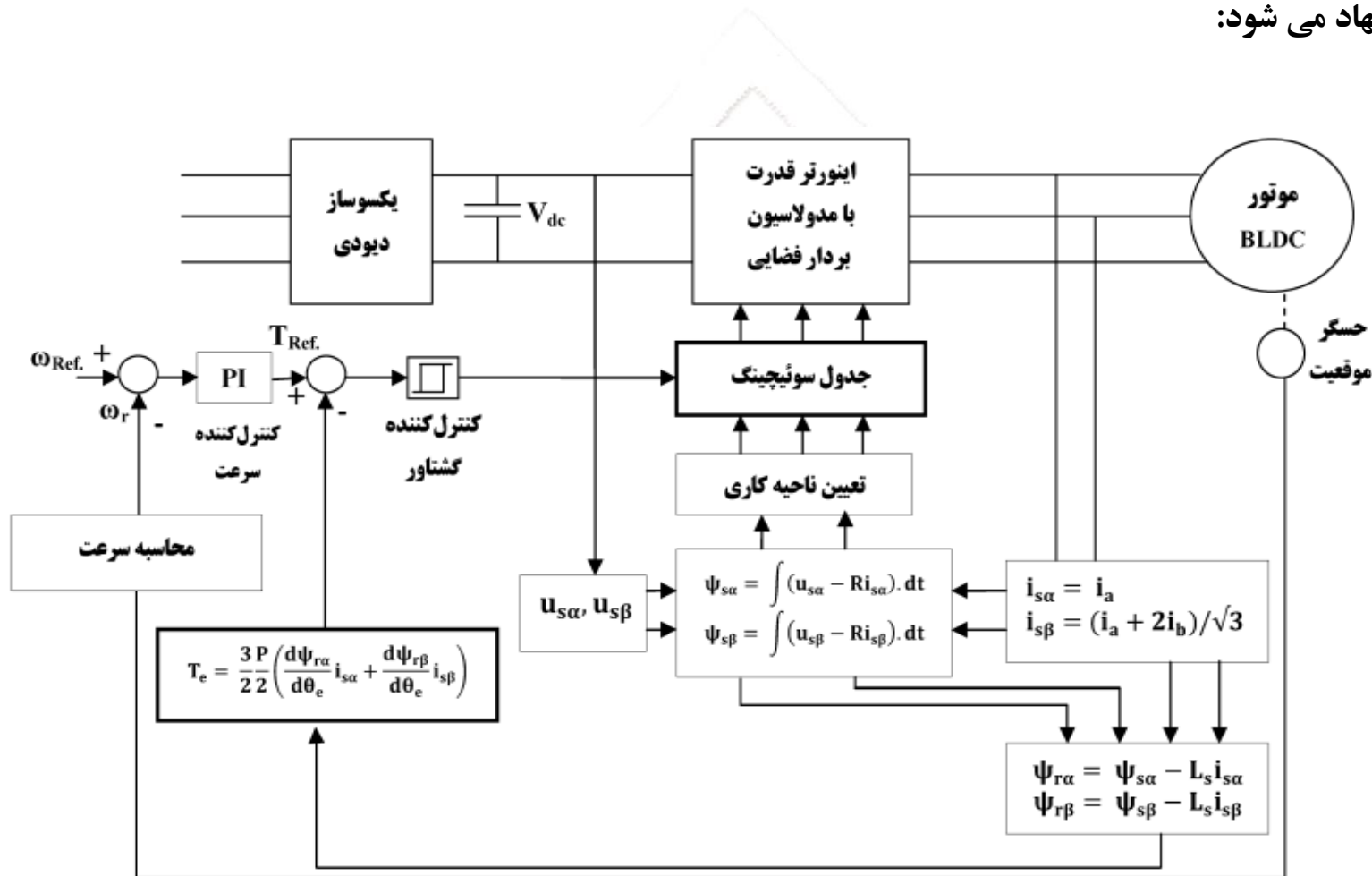


$\Delta$  (باند کنترلر هیستورزیس شار)

تغییرات دامنه شار استاتور در روش DTC از نوع هدایت دو فاز موتور BLDC



✓ لذا جهت سادگی روش DTC در کنترل موتور BLDC، استفاده از تنها کنترلر گشتاور کافی است و بر این مبنا سیستم کنترلی زیر پیشنهاد می شود:



کنترل موتور BLDC به روش DTC فقط با استفاده از کنترلر هیستریزس گشتاور



جدول سوئیچینگ ارائه شده را در حالت عدم کنترل شار استاتور می توان بصورت زیر در نظر گرفت:

جدول سوئیچینگ مورد استفاده در کنترل موتور BLDC به روش DTC با هدایت جریان در دو فاز با بکارگیری تنها کنترلر گشتاور

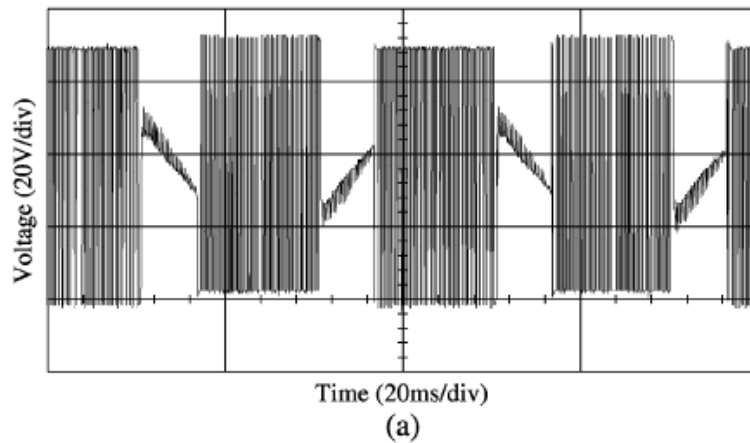
جدول سوئیچینگ مورد استفاده در کنترل موتور BLDC به روش DTC با هدایت جریان در دو فاز با بکارگیری هر دو کنترلر گشتاور و شار

علامت $\Delta T_e$ ناحیه ( $\theta_e$ )	+1	-1
۱ (۳۰-۳۳۰ درجه)	V <sub>2</sub> (001001)	V <sub>5</sub> (000110)
۲ (۳۰-۹۰ درجه)	V <sub>3</sub> (011000)	V <sub>6</sub> (100100)
۳ (۹۰-۱۵۰ درجه)	V <sub>4</sub> (010010)	V <sub>1</sub> (100001)
۴ (۱۵۰-۲۱۰ درجه)	V <sub>5</sub> (000110)	V <sub>2</sub> (001001)
۵ (۲۱۰-۲۷۰ درجه)	V <sub>6</sub> (100100)	V <sub>3</sub> (011000)
۶ (۲۷۰-۳۳۰ درجه)	V <sub>1</sub> (100001)	V <sub>4</sub> (010010)

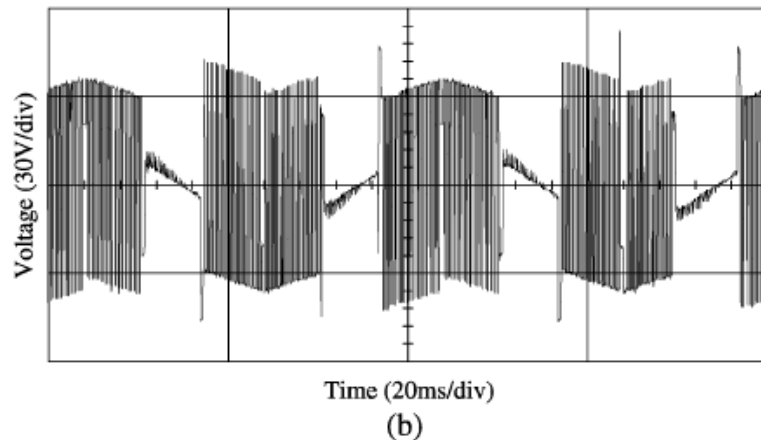
Torque $\tau$	Flux $\phi$	Sector					
		I	II	III	IV	V	VI
1	1	V <sub>1</sub> (100001)	V <sub>2</sub> (001001)	V <sub>3</sub> (011000)	V <sub>4</sub> (010010)	V <sub>5</sub> (000110)	V <sub>6</sub> (100100)
	0	V <sub>2</sub> (001001)	V <sub>3</sub> (011000)	V <sub>4</sub> (010010)	V <sub>5</sub> (000110)	V <sub>6</sub> (100100)	V <sub>1</sub> (100001)
	-1	V <sub>3</sub> (011000)	V <sub>4</sub> (010010)	V <sub>5</sub> (000110)	V <sub>6</sub> (100100)	V <sub>1</sub> (100001)	V <sub>2</sub> (001001)
-1	1	V <sub>1</sub> (100001)	V <sub>2</sub> (001001)	V <sub>3</sub> (011000)	V <sub>4</sub> (010010)	V <sub>5</sub> (000110)	V <sub>6</sub> (100100)
	0	V <sub>5</sub> (000110)	V <sub>6</sub> (100100)	V <sub>1</sub> (100001)	V <sub>2</sub> (001001)	V <sub>3</sub> (011000)	V <sub>4</sub> (010010)
	-1	V <sub>3</sub> (011000)	V <sub>4</sub> (010010)	V <sub>5</sub> (000110)	V <sub>6</sub> (100100)	V <sub>1</sub> (100001)	V <sub>2</sub> (001001)



✓ برای موتور BLDC با مشخصات ارائه شده در جدول زیر نتایج شبیه سازی و همچنین نتایج آزمایشگاهی بکارگیری روش DTC آورده می شود (مقاله آقای Howe در IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, 2005)

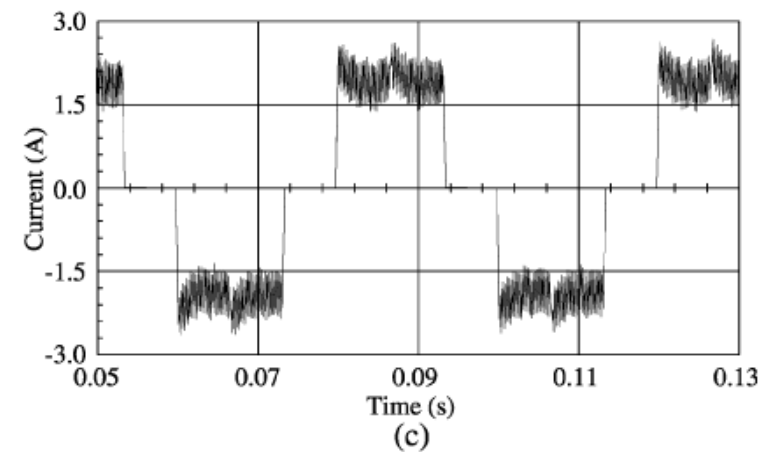


تغییرات ولتاژ فاز به ستاره موتور

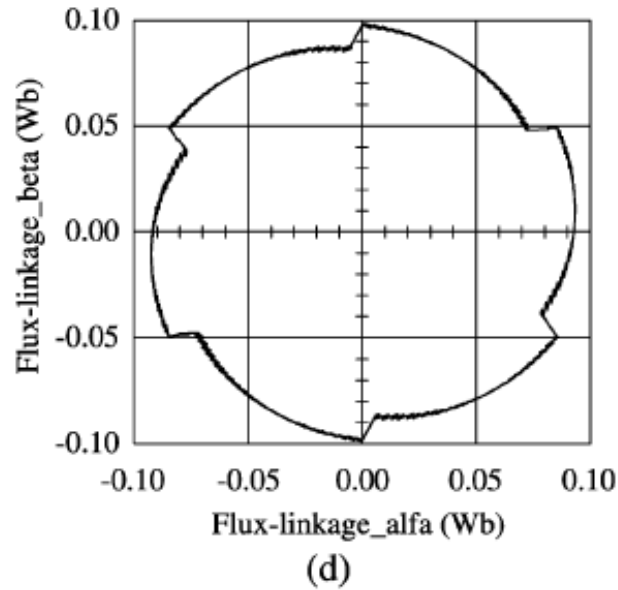


تغییرات ولتاژ خط به خط

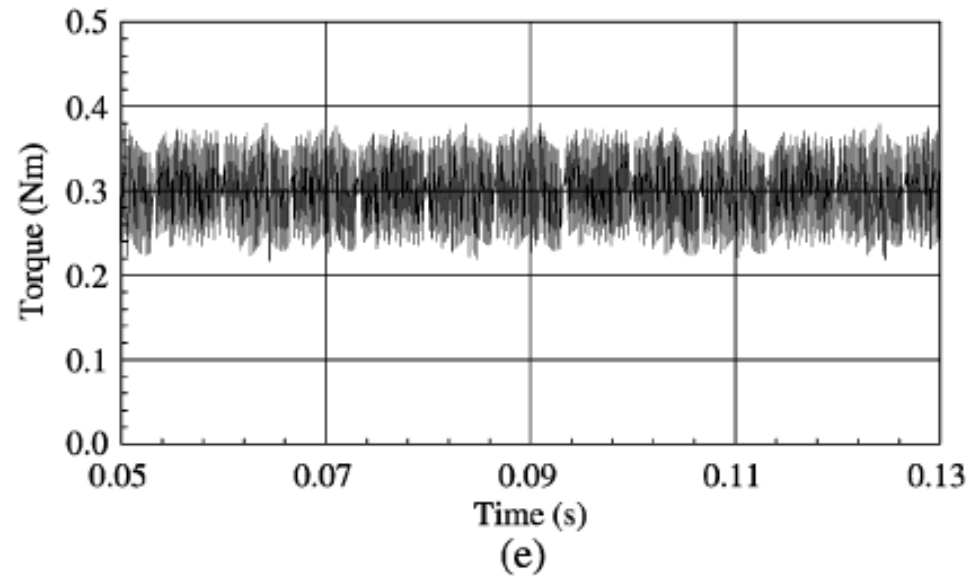
Number of poles, p	10
Number of slots	12
DC link voltage (V)	36
Rated speed (rpm)	400
PM excitation flux-linkage (Wb):	0.0794
Phase resistance ( $\Omega$ )	0.35
Self-inductance (mH)	4.64
Mutual-inductance (mH)	0.0023



تغییرات جریان فاز



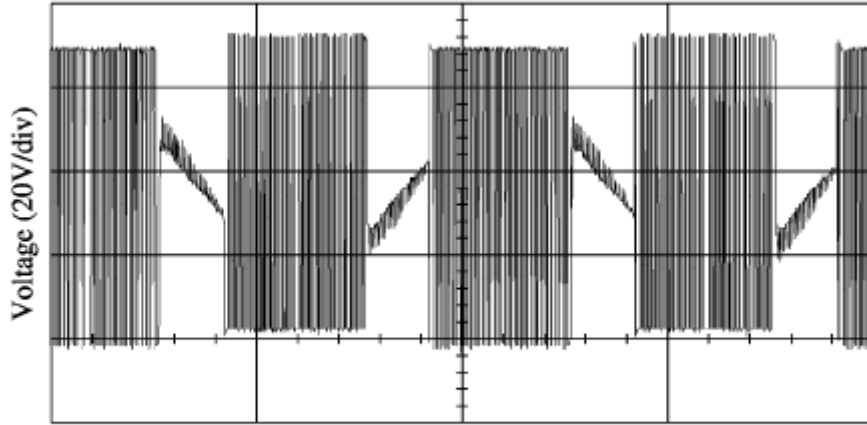
تغییرات زاویه ای بردار شار استاتور



تغییرات گشتاور موتور

✓ مشاهده می گردد که شار استاتور در هر 60 درجه یک پرش بواسطه صفر شدن جریان فاز دارد.

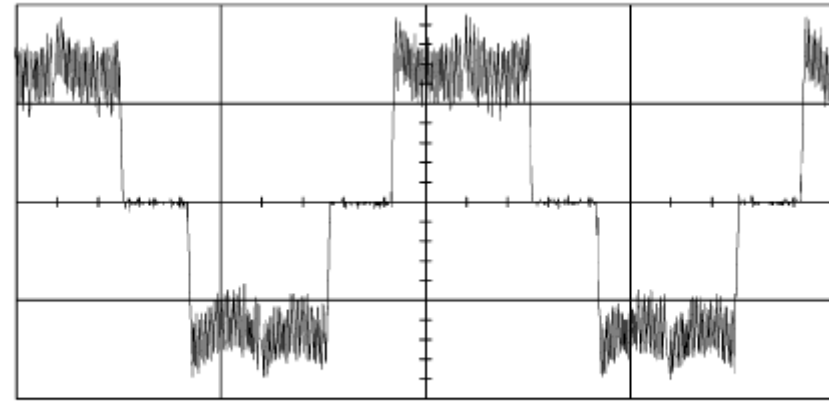
✓ رپل گشتاور هم به نسبت قابل ملاحظه است. جهت کاهش رپل گشتاور باید پهنای باند هیستریزس کنترلر گشتاور را کاهش داد که نتیجه آن افزایش تلفات و فرکانس سوئیچینگ کلیدها می باشد.



Time (20ms/div)

(a)

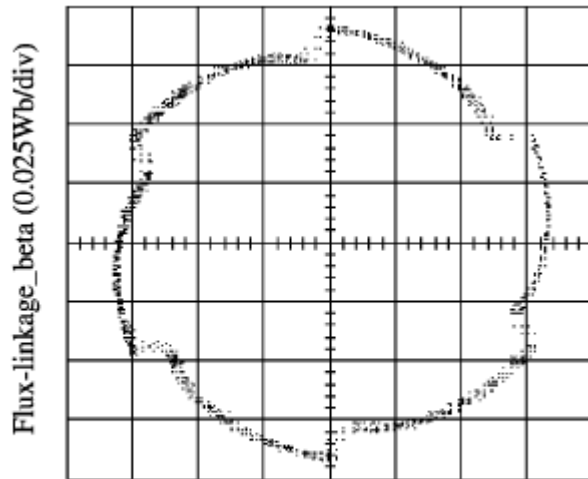
تغییرات ولتاژ فاز به ستاره موتور



Time (20ms/div)

(c)

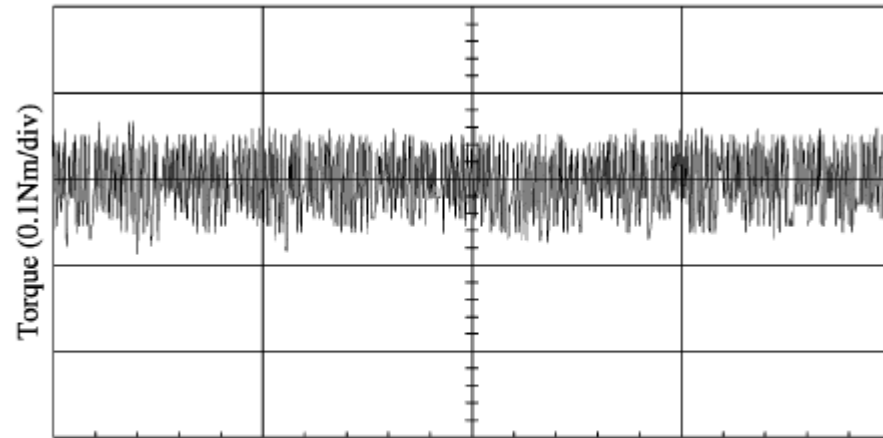
تغییرات جریان فاز



Flux-linkage\_alfa (0.025Wb/div)

(d)

تغییرات زاویه ای بردار شار استاتور



Time (20ms/div)

(e)

تغییرات گشتاور موتور



- ✓ از ملزومات استفاده از روش DTC، دانستن مقادیر لحظه ای شار و گشتاور برای استفاده در حلقه های کنترل شار و گشتاور است.
- ✓ مقادیر لحظه ای شار و گشتاور با استفاده از مقادیر ولتاژ و جریانهای فازهای استاتور حاصل می شوند.
- ✓ جریانهای دو فاز یا سه فاز با دو یا سه سنسور جریان اندازه گیری می شوند.
- ✓ ولتاژهای سه فاز نیز باید با سه سنسور ولتاژ اندازه گیری شوند. البته می توان بجای آن، با اندازه گیری ولتاژ باس DC و فرمانهای صادره به اینورتر ولتاژهای سه فاز را ساخت.
- ✓ اگرچه ابتدائاً ممکن است به نظر برسد در حالت عدم استفاده از کنترلر شار استاتور، نیازی به محاسبه شار نیست، اما باید توجه داشت که بردار شار در محاسبه مقدار گشتاور لحظه ای مورد استفاده قرار می گیرد.
- ✓ برای محاسبه مقادیر لحظه ای شار استاتور و گشتاور موتور BLDC از روابط موتور در دستگاه دو محوری دوار dq یا ساکن  $\alpha\beta$  استفاده می گردد.

✓ بردار شار در دستگاه ساکن استاتور از رابطه برداری انتگرالی زیر حاصل می شود:

$$\vec{\Psi}_s = \int (\vec{V}_s - R\vec{i}_s) dt \quad (10)$$

✓ برای موتور PM با Saliency ( $L_d \neq L_q$ )، مولفه های شار استاتور در دستگاه  $\alpha\beta$  از روابط زیر قابل محاسبه خواهند بود:

$$\begin{cases} \Psi_{s\alpha} = \int (V_{s\alpha} - R i_{s\alpha}) dt \\ \Psi_{s\beta} = \int (V_{s\beta} - R i_{s\beta}) dt \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \Psi_s = \sqrt{\Psi_{s\alpha}^2 + \Psi_{s\beta}^2} \\ \theta = \arctan \frac{\Psi_{s\beta}}{\Psi_{s\alpha}} \end{cases} \quad (12)$$

✓ لذا دامنه و فاز شار استاتور از رابطه زیر قابل محاسبه است:

✓ گشتاور الکترومغناطیسی برای یک موتور براشلس (PM) با ولتاژ ضدمحر که دلخواه (سینوسی/ذوزنقه ای/غیره) با/بدون وجود Saliency در دستگاه dq دوار با صرفنظر از کوپل متقابل بین  $L_d$  و  $L_q$  از رابطه زیر بدست می آید:

$$T_e = \frac{3P}{4} \cdot \left[ \left( \frac{dL_d}{d\theta_e} i_{sd} + \frac{d\psi_{rd}}{d\theta_e} - \psi_{sq} \right) i_{sd} + \left( \frac{dL_q}{d\theta_e} i_{sq} + \frac{d\psi_{rq}}{d\theta_e} + \psi_{sd} \right) i_{sq} \right] \quad (13)$$

$$\begin{cases} \psi_{sd} = \psi_{rd} + L_d i_{sd} \\ \psi_{sq} = \psi_{rq} + L_q i_{sq} \end{cases} \quad (14)$$

○ که در آن داریم:

○ معمولاً اندوکتانسهای  $L_q$  و  $L_d$  ثابت هستند و رابطه (۴) با جایگذاری روابط (۵) در آن، به رابطه زیر قابل ساده شدن است:

$$T_e = \frac{3P}{4} \cdot \left[ \left( \frac{d\psi_{rd}}{d\theta_e} - \psi_{rq} \right) i_{sd} + \left( \frac{d\psi_{rq}}{d\theta_e} + \psi_{rd} \right) i_{sq} + (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq} \right] \quad (15)$$

✓ برای موتور BLDC بدون Saliency (آهنربا روی سطح روتور است)، مقادیر  $L_q$  و  $L_d$  برابرند و لذا داریم:

$$T_e = \frac{3P}{4} \cdot \left[ \left( \frac{d\psi_{rd}}{d\theta_e} - \psi_{rq} \right) i_{sd} + \left( \frac{d\psi_{rq}}{d\theta_e} + \psi_{rd} \right) i_{sq} \right] \quad (16)$$



$$T_e = \frac{3P}{4} \cdot \left[ \left( \frac{d\psi_{rd}}{d\theta_e} - \psi_{rq} \right) i_{sd} + \left( \frac{d\psi_{rq}}{d\theta_e} + \psi_{rd} \right) i_{sq} \right] \quad (17)$$

✓ در بسیاری موارد مطلوب است تا محاسبه گشتاور بجای انجام در دستگاه dq دوار با سرعت روتور (رابطه (۷)) در دستگاه ساکن  $\beta\alpha$  انجام گردد. برای این منظور، به طریق زیر عمل می کنیم:

○ شار و جریان روتور در دستگاه ساکن  $\beta\alpha$  از مقادیر شار و جریان روتور در دستگاه dq روتور اینگونه بدست می آید:

$$\begin{cases} \psi_{r\alpha} = \psi_{rd} \cos \theta_e - \psi_{rq} \sin \theta_e \\ \psi_{r\beta} = \psi_{rd} \sin \theta_e + \psi_{rq} \cos \theta_e \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} i_{r\alpha} = i_{rd} \cos \theta_e - i_{rq} \sin \theta_e \\ i_{r\beta} = i_{rd} \sin \theta_e + i_{rq} \cos \theta_e \end{cases} \quad (19)$$

○ با جایگذاری روابط (۱۸) و (۱۹) در رابطه (۱۷)، گشتاور در دستگاه ساکن  $\beta\alpha$  از رابطه زیر بدست می آید:

$$T_e = \frac{3P}{4} \cdot \left[ \frac{d\psi_{r\alpha}}{d\theta_e} i_{s\alpha} + \frac{d\psi_{r\beta}}{d\theta_e} i_{s\beta} \right] \quad (20)$$



$$T_e = \frac{3P}{4} \cdot \left[ \frac{d\psi_{r\alpha}}{d\theta_e} i_{s\alpha} + \frac{d\psi_{r\beta}}{d\theta_e} i_{s\beta} \right] \quad (20)$$

○ در رابطه فوق، داریم:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{r\alpha}}{d\theta_e} = \frac{e_\alpha}{\omega_e} \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{d\theta_e} = \frac{e_\beta}{\omega_e} \end{cases} \quad (21)$$

○ رابطه (20) با استفاده از رابطه (21) قابل تبدیل به رابطه زیر است:

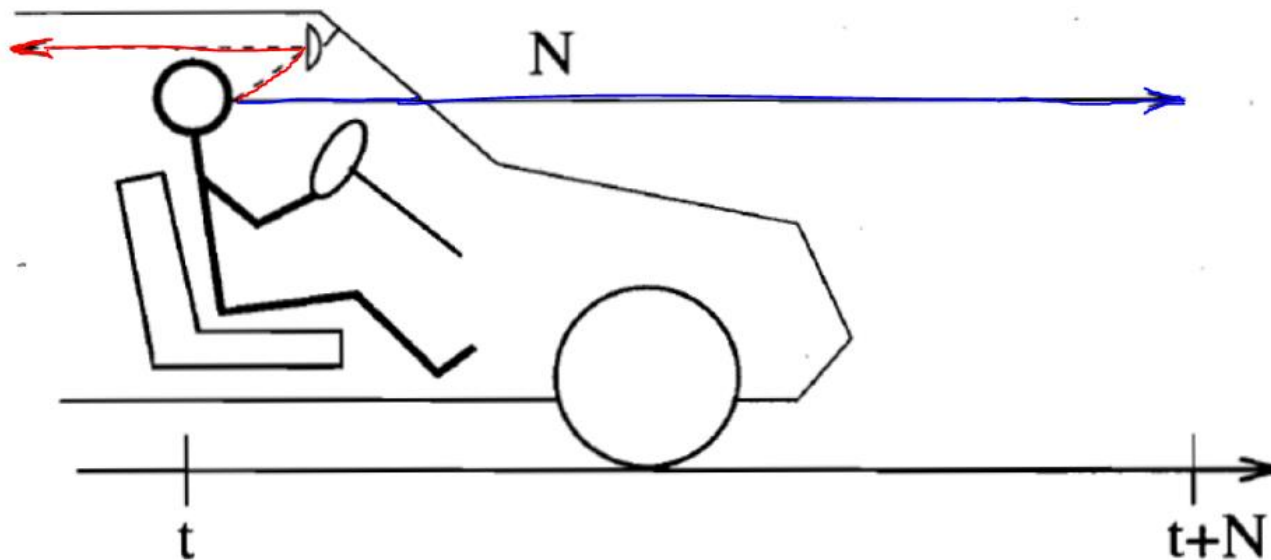
$$T_e = \frac{3P}{4} \cdot \left[ \frac{e_\alpha}{\omega_e} i_{s\alpha} + \frac{e_\beta}{\omega_e} i_{s\beta} \right] \quad (22)$$

$$= \frac{3P}{4} \cdot \left[ k_\alpha(\theta_e) i_{s\alpha} + k_\beta(\theta_e) i_{s\beta} \right] \quad (23)$$

○ در رابطه فوق ضرایب  $k_\alpha$  و  $k_\beta$ ، ضرایب ولتاژ ضدمحرکه در دستگاه ساکن  $\alpha\beta$  هستند که با توجه به شکل موج ولتاژ ضدمحرکه فازها قابل محاسبه هستند.

○ مزیت بزرگ استفاده از رابطه (23)، عدم وابستگی رابطه گشتاور به سرعت است که حتی تا سرعتهای نزدیک به صفر یا صفر نیز گشتاور قابل محاسبه است.

- ✓ روشهای کنترل پیش بین مدل از روشهای جدید کنترلی هستند که برای کنترل بهینه سیستمهای غیرخطی به ویژه در کاربردهای سوئیچینگ و ادوات الکترونیک قدرت، بسیار قدرتمند هستند.
- ✓ در این روش، با استفاده از مدل سیستم، رفتار آینده سیستم را پیش بینی نموده و با این آگاهی، سیگنال کنترلی مطلوب به سیستم اعمال می شود تا به هدف مطلوب برسیم.
- ✓ در روشهای کنترل کلاسیک اغلب بر مبنای داده های قبلی، سیگنال کنترل جدید تعیین می شود اما در روش کنترل پیش بین با پیشی بینی آینده سیستم، سیگنال کنترلی جدید تعیین می شود.



مقایسه روش کنترلی پیش بین با روش های کلاسیک

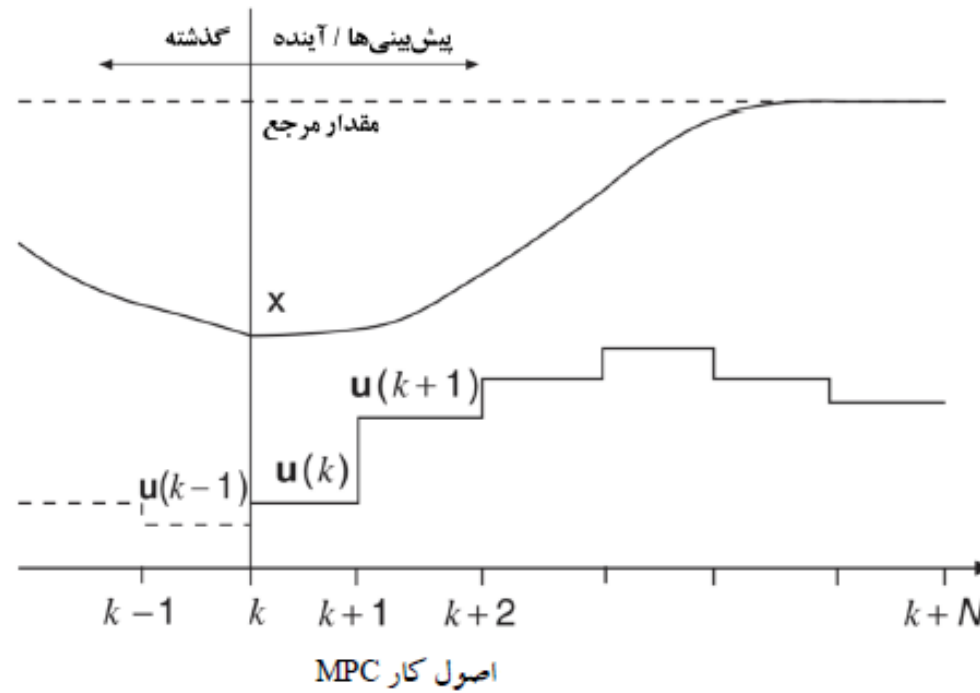


- ✓ مدل سیستم مورد استفاده در روش کنترل پیش بین، یک مدل زمان گسسته است.
- ✓ هدف مطلوب هم مینیمم کردن یک تابع هزینه است که آنرا خودمان به طور مناسبی انتخاب می کنیم.

$$x(k + 1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (24)$$

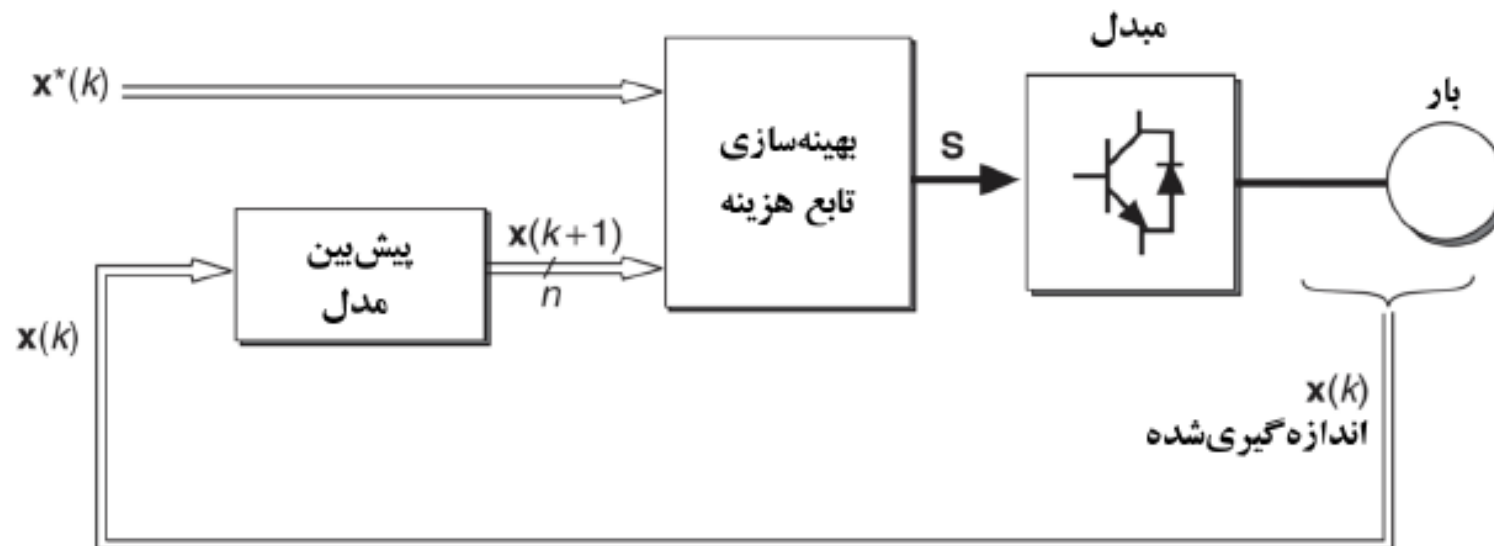
$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (25)$$

$$J = f(x(k), u(k), \dots, u(k + N)) \quad (26)$$



✓ در طرح MPC برای مبدل های الکترونیک قدرت، مبدل می تواند هر نوعی باشد، بار می تواند هر باری باشد و تابع هزینه هم متناسب با کاربرد، می تواند هر تابعی از متغیرهای حالت باشد که معمولا انرژی خطای ردیابی را بعنوان تابع هزینه در نظر می گیرند.

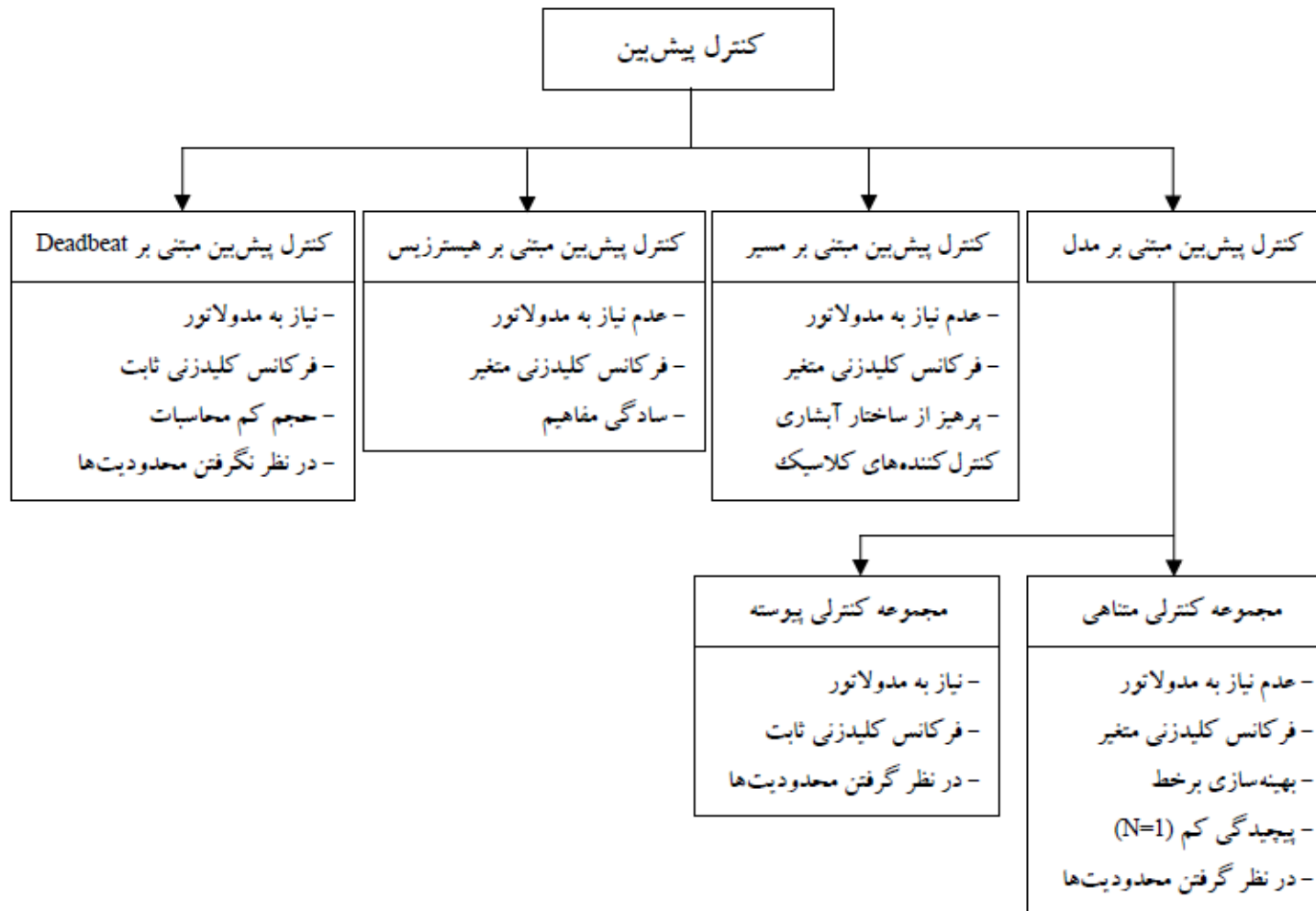
✓ در سیستم زیر، در بلوک پیش بین مدل، با استفاده از متغیرهای حالت کنونی  $x(k)$ ، رفتار آینده سیستم  $x(k+1)$  تخمین زده می شود و با توجه به رفتار مطلوب سیستم  $x^*(k)$ ، سیگنال کنترل  $S$  به نحوی تعیین می شود تا تابع هزینه که معمولا انرژی خطای ردیابی یعنی  $[x^*(k) - x(k+1)]^2$  است، حداقل بشود.



بلوک دیاگرام کنترل MPC برای مبدل های الکترونیک قدرت



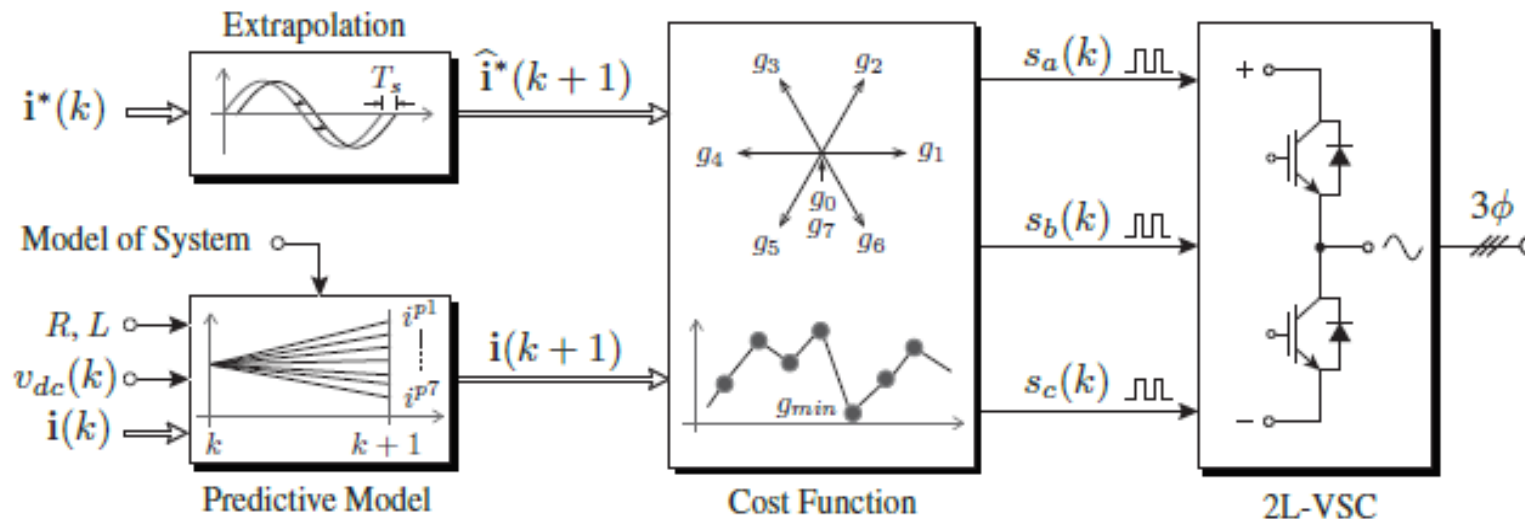
✓ از میان روشهای مختلف کنترل پیش بین ارائه شده، روش کنترل پیش بین مدل بر مبنای مجموعه کنترلی متناهی یا محدود (FCS-MPC) دارای کاربرد فراوانی در کنترل محرکه ها است.



طبقه بندی روش های مختلف کنترل پیش بین در کاربردهای الکترونیک قدرت

### مراحل روش FCS-MPC:

۱. استفاده از یک مدل زمان گسسته از سیستم برای پیش بینی رفتار آینده متغیرها
۲. تعیین یک تابع هزینه مناسب که رفتار مطلوب سیستم را بیان می کند
۳. تحریک بهینه که با حداقل نمودن تابع هزینه تعیین می شود

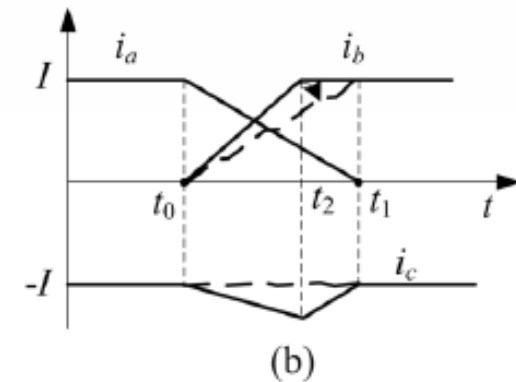
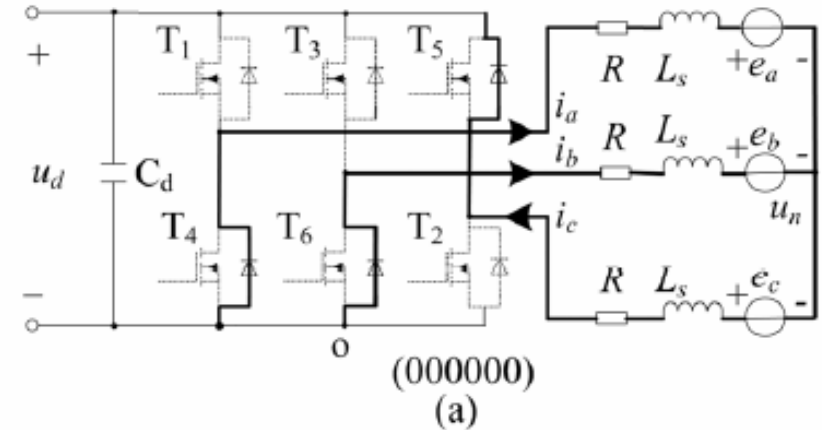


نمای کلی از روش کنترل FCS-MPC

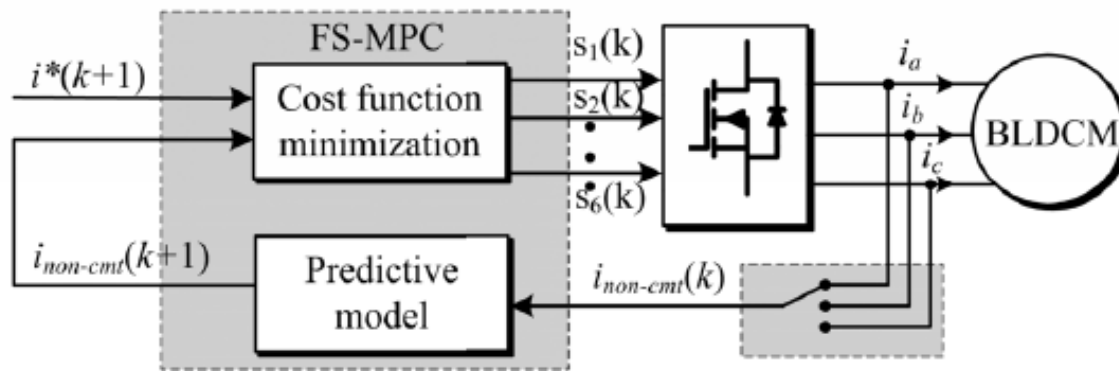
✓ در این بخش، از روش FCS-MPC برای حذف ریپل جریان فاز غیر دخیل در کموتاسیون استفاده می شود.

Implementation of Finite-State Model Predictive Control for Commutation Torque Ripple Minimization of Permanent-Magnet Brushless DC Motor, by: Changliang Xia  
IEEE Transactions on Industrial Electronics ( Volume: 60, Issue: 3, March 2013)

$$G = |i^*(k+1) - i_{non-cmt}(k+1)| \quad (27) \quad \text{تابع هزینه مورد استفاده:}$$

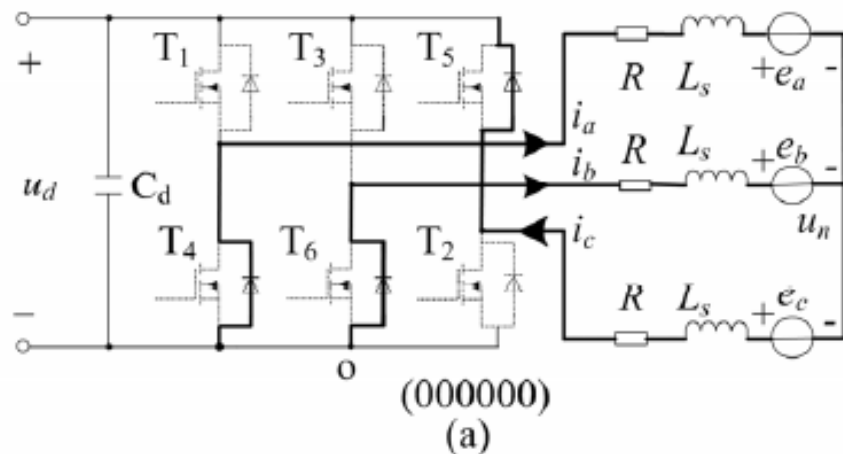


(الف) لحظه کموتاسیون جریان بین دو فاز a و b که جریان فاز c بخاطر عملکرد دیودها دچار اعوجاج شده است.



(ب) بلوک دیاگرام روش کنترل FCS-MPC برای حذف اعوجاج جریان فاز c در لحظات کموتاسیون





○ جریان فاز غیردخیل در کموتاسیون مطابق مدار شکل فوق از رابطه زیر بدست می آید:

$$u_{a0} + u_{b0} - 2u_{c0} = -3Ri_c - 3L_s \frac{di_c}{dt} + (e_a + e_b - 2e_c) \quad (28)$$

○ برای تبدیل مدل زمان پیوسته فوق به مدل زمان گسسته، مشتق جریان از رابطه گسسته زیر جایگزین می شود:

$$di_c/dt \approx (i_c(k) - i_c(k-1))/T_s \quad (29)$$

○ و رابطه زمان گسسته زیر برای جریان غیردخیل در کموتاسیون در زمان کنونی یعنی  $i_c(k)$  بدست می آید:

$$i_c(k) = -\frac{(u_{a0} + u_{b0} - 2u_{c0})T_s}{3RT_s + 3L_s} + \frac{(e_a + e_b - 2e_c)T_s + 3L_s i_c(k-1)}{3RT_s + 3L_s} \quad (30)$$



# کنترل موتور BLDC به روش FCS-MPC

انتخاب سیگنال کنترلی بهینه

$$i_c(k) = -\frac{(u_{a0} + u_{b0} - 2u_{c0})T_s}{3RT_s + 3L_s} + \frac{(e_a + e_b - 2e_c)T_s + 3L_s i_c(k-1)}{3RT_s + 3L_s} \quad (31)$$

مقدار زمان بعدی جریان  $i_c$  یعنی  $i_c(k+1)$  با استفاده از رابطه فوق بصورت زیر قابل محاسبه است:

$$i_c(k+1) = -\frac{(u_{a0}(k+1) + u_{b0}(k+1) - 2u_{c0}(k+1))T_s}{3RT_s + 3L_s} + \frac{(e_a(k+1) + e_b(k+1) - 2e_c(k+1))T_s + 3L_s i_c(k)}{3RT_s + 3L_s} \quad (32)$$

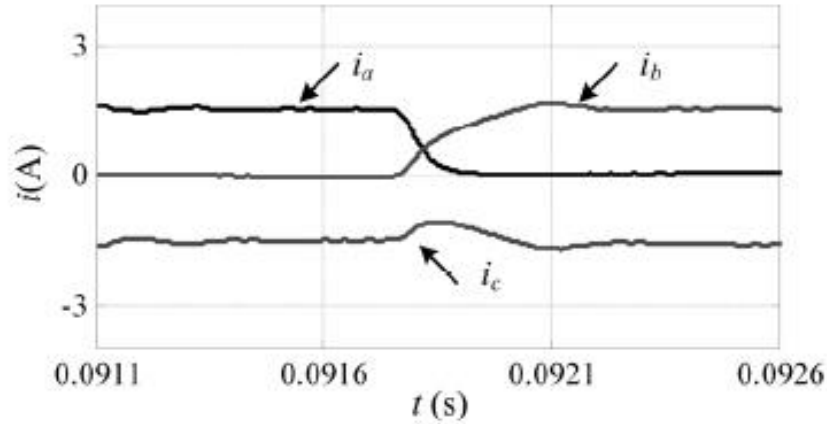
حال، برای همه حالات سوئیچینگ ممکن اینورتر (بردارهای زیر)، مقادیر ولتاژهای  $u_{a0}$ ،  $u_{b0}$  و  $u_{c0}$  در رابطه فوق محاسبه و حالتی که تابع هزینه زیر را محدود کند، بعنوان حالت سوئیچینگ بهینه در نظر می گیریم و این حالت را به اینورتر اعمال می کنیم:

$$G = |i^*(k+1) - i_{non-cmt}(k+1)| \quad (33)$$

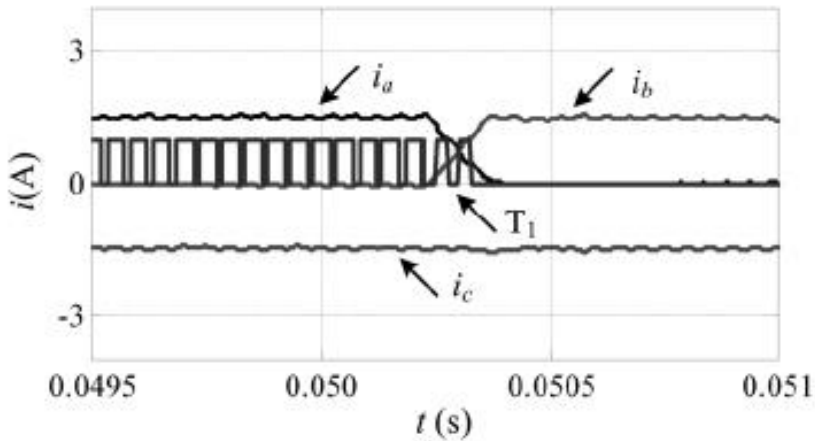
حالات سوئیچینگ در کموتاسیون از فاز a به فاز b:

Status(1) (011000)      Status(2) (111000)      Status(3) (000000)

$$\begin{bmatrix} u_{a0} \\ u_{b0} \\ u_{c0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ u_d \\ 0 \end{bmatrix} = u(1), \quad \begin{bmatrix} u_{a0} \\ u_{b0} \\ u_{c0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_d \\ 0 \end{bmatrix} = u(2), \quad \begin{bmatrix} u_{a0} \\ u_{b0} \\ u_{c0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_d \end{bmatrix} = u(3)$$

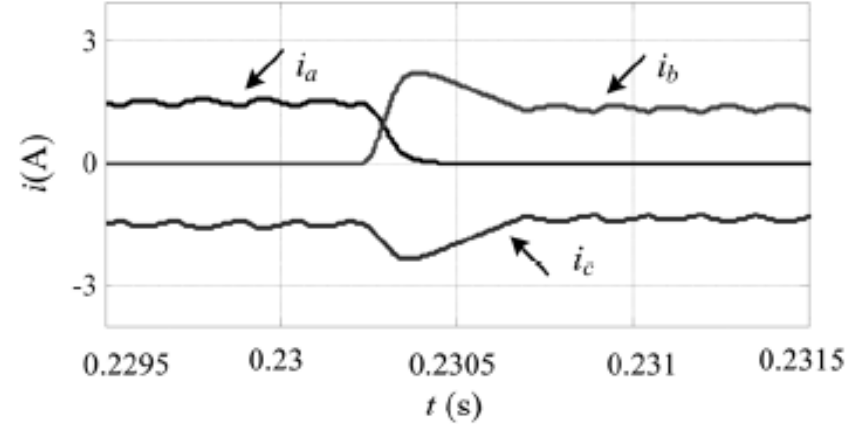


(a)

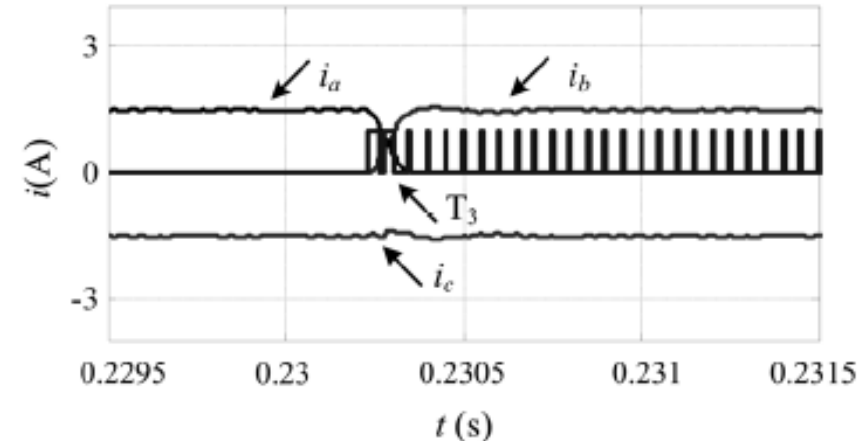


(b)

(ب) نتایج شبیه سازی در سرعت بالا  
روش معمولی (a) روش MPC (b)



(a)



(b)

(الف) نتایج شبیه سازی در سرعت پایین  
روش معمولی (b) روش MPC (a)

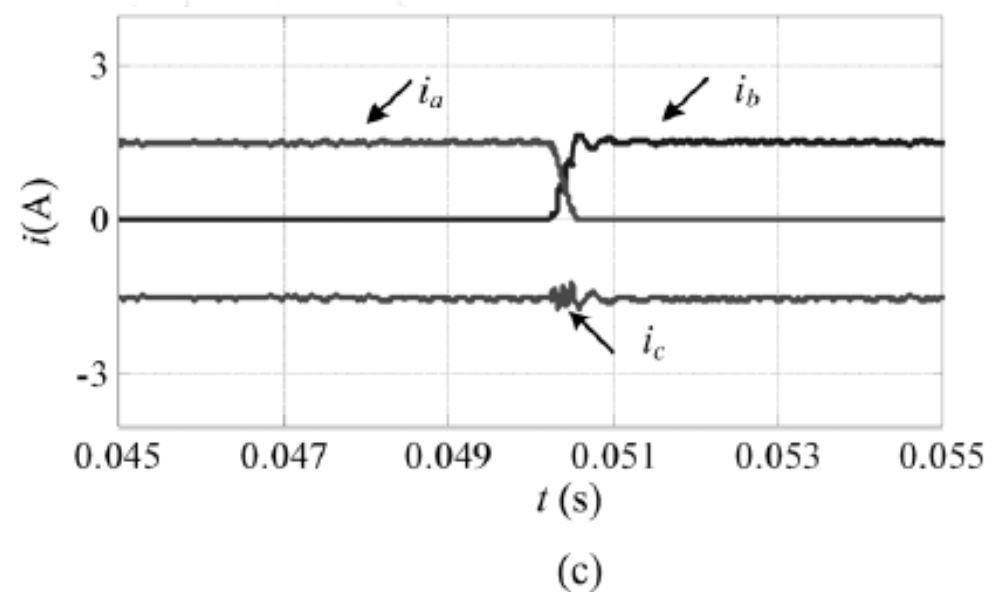
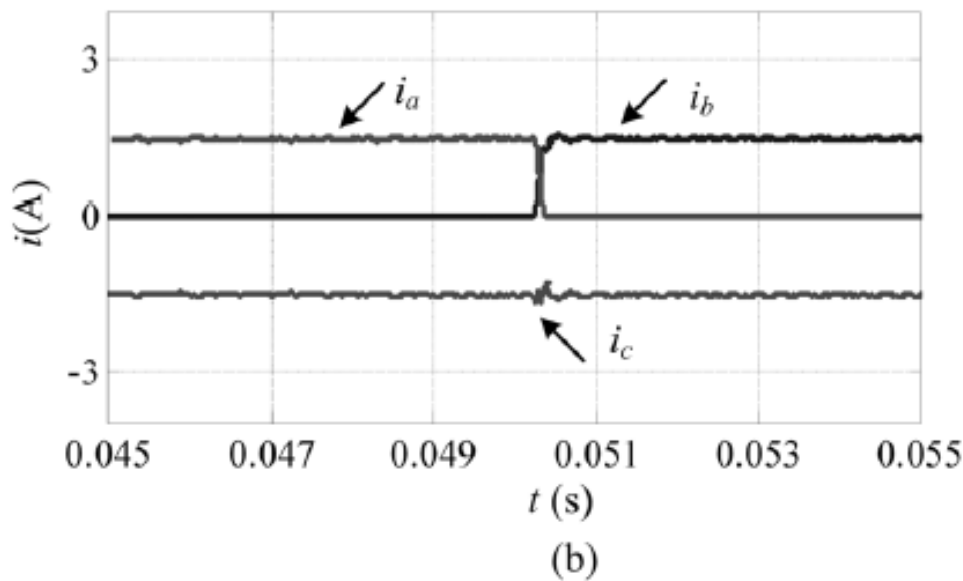


# کنترل موتور BLDC به روش FCS-MPC

حساسیت به پارامترها

- ✓ یکی از مشکلات استفاده از روش MPC، حساسیت به پارامترهای مدل است که اگر تغییر کنند، پیش بینی مدل دارای خطا خواهد بود و ممکن است که جواب مطلوبی به همراه نداشته باشد.
- ✓ مثلاً در رابطه زیر، مقدار به مقاومت استاتور R و اندوکتانس  $L_s$  وابسته است.

$$i_c(k+1) = -\frac{(u_{a0}(k+1) + u_{b0}(k+1) - 2u_{c0}(k+1))T_s}{3RT_s + 3L_s} + \frac{(e_a(k+1) + e_b(k+1) - 2e_c(k+1))T_s}{3RT_s + 3L_s} + \frac{3L_s i_c(k)}{3RT_s + 3L_s} \quad (34)$$



رفتار روش کنترل MPC در مواجهه با تغییرات پارامترهای موتور (b) تغییر ۱۰٪ در R (c) تغییر ۱۰٪ در  $L_s$





✓ مثالی که از استفاده از MPC برای کنترل موتور BLDC ذکر شد فقط برای بهبود ریپل گشتاور کموتاسیون بود.  
 ✓ می توان تابع هزینه را موارد دیگر در نظر گرفت از جمله:

$$g = (i_{ref} - i(k + 1))^2 \quad (35)$$

○ خطای جریان در بازه های هدایت

$$f_1 = |i_{\alpha}^*(k + 1) - i_{\alpha}^p(k + 1)| + |i_{\beta}^*(k + 1) - i_{\beta}^p(k + 1)| \quad (36)$$

○ خطای ردیابی سرعت

$$J = |r(t + N|t) - \omega_m(t + N|t)| \quad (37)$$

$$J = p[i_{ap}(k + 1) - i_{ar}(k + 1)]^2 + qu_a^2(k) \quad (38)$$

○ خطای ردیابی جریان و دامنه ولتاژ

$$g = (i_{(k+1)}^* - i_{(k+1)}^{non-cm})^2 + (T_e^{ref} - T_e^{(k+1)})^2 \quad (39)$$

○ خطای ردیابی جریان و گشتاور

✓ برای کاهش حساسیت این روش به پارامترهای موتور، از روشهای MPC مستقل از مدل و یا تطبیقی هم استفاده شده است.