



## بخش هفتم:

# روش های کنترل بدون حسگر موتورهای بر اشلس

□ مقدمه

□ روش های کنترل بدون حسگر موتورهای BLDC

□ روش های کنترل بدون حسگر موتورهای PMSM



- ✓ منظور از کنترل بدون حسگر موتور یعنی کنترل موتور بدون استفاده از حسگرهای الکترونیکی و یا الکترومکانیکی سرعت (یا موقعیت) است (کنترل بدون حسگر سرعت می تواند حلقه بسته و یا حلقه باز باشد)
- ✓ به عبارت دیگر کمیت‌های سرعت/موقعیت موتور با اندازه گیری سایر کمیت‌های موتور نظیر جریان و ولتاژ، تخمین زده می شوند.

### ➤ معایب استفاده از حسگرهای موقعیت (یا سرعت):

- ۱- مشکلات جانمایی سنسور سرعت در داخل موتور و یا روی محور موتور
  - ۲- پیچیدگی سخت افزاری درایو
  - ۳- پائین آمدن قابلیت اطمینان
  - ۴- مسائل مرتبط با تعمیرات و نگهداری
  - ۵- شرایط کاری نامساعد نظیر کثیفی، حرارت، ارتعاشات مکانیکی
  - ۶- هزینه بالای تمام شده درایو
- ✓ با توجه به معایب فوق، روشهای کنترل بدون حسگر (Sensorless control) در درایو موتورهای الکتریکی مورد توجه قرار گرفته است. بر این مبنا، موقعیت یا سرعت موتور تخمین زده می شود و در حلقه کنترل سرعت مورد استفاده قرار می گیرند.
  - ✓ برخی از روشهای کنترل حلقه بسته سرعت (مثل کنترل اسکالر)، تخمین تنها سرعت کفایت می کند. اما در برخی روشها نظیر کنترل برداری موتورها و یا کنترل موتور BLDC، برای کنترل حلقه بسته سرعت، اطلاعات موقعیت موتور نیز ضروری است.
  - ✓ حتی در کنترل حلقه باز برخی موتورها نظیر BLDC، اطلاعات موقعیت مورد نیاز است.

➤ دسته بندی انواع روشهای تخمین سرعت (یا موقعیت) موتورهای الکتریکی:

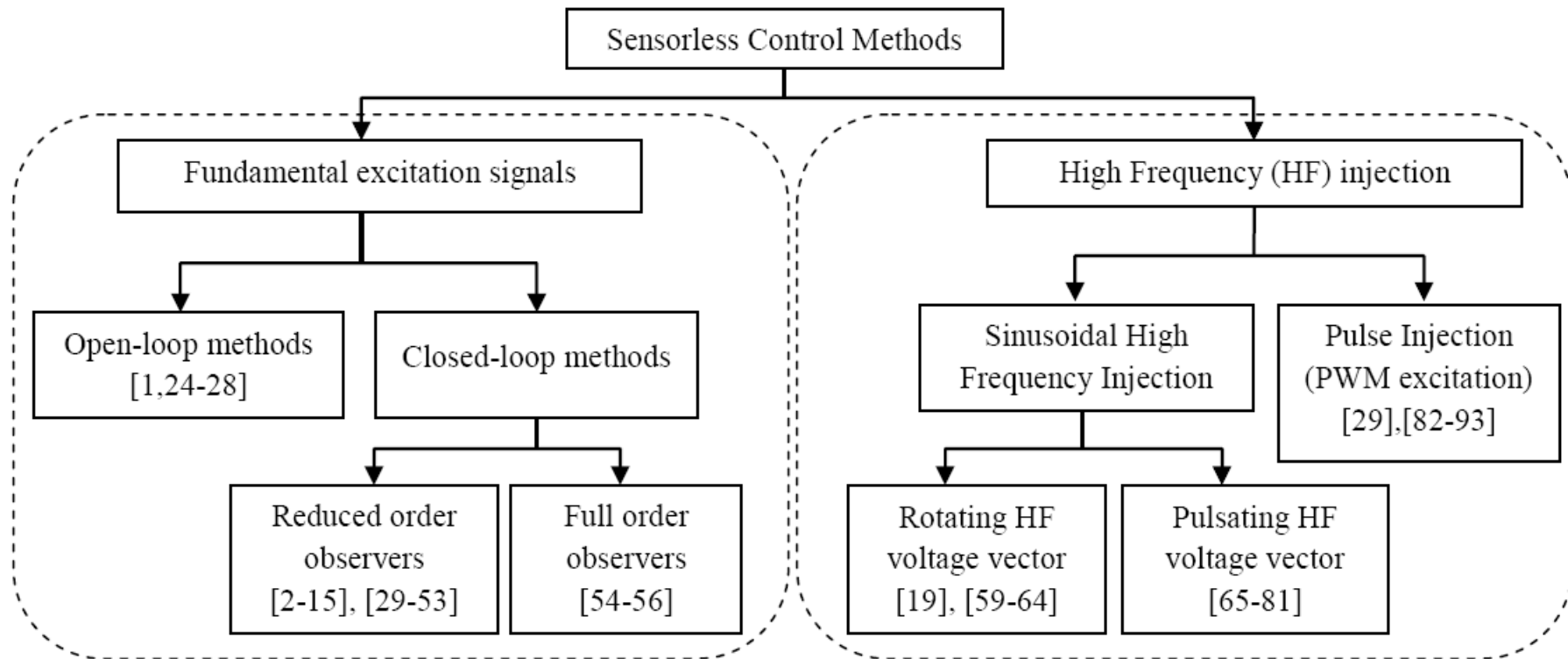
- ۱- روشهای بر مبنای تحلیل سیگنال تحریک اصلی موتور (مدل اصلی موتور)
- ۲- روشهای بر مبنای تحلیل سیگنال فرکانس بالای تزریق شده به سیگنال تحریک اصلی موتور

➤ انواع روشهای تخمین بر مبنای تحلیل سیگنال تحریک اصلی موتور:

- ۱- روشهای تخمین حلقه باز
  - ۲- روشهای تخمین حلقه بسته
- a. با استفاده از روئیتگرهای مرتبه کامل
- b. با استفاده از روئیتگرهای مرتبه کاهش یافته

➤ انواع روشهای تخمین بر مبنای تحلیل سیگنال فرکانس بالای تزریقی:

- ۱- با تزریق سیگنال فرکانس بالای سینوسی
- ۲- با تزریق سیگنال فرکانس بالای پالسی



دسته بندی روشهای مختلف تخمین در کنترل بدون حسگر موتورهای الکتریکی

✓ در کنترل بدون حسگر اغلب موتورهای الکتریکی، استفاده از روشهای بر مبنای تحلیل سیگنال تحریک اصلی مرسوم تر است و لذا در این فصل اغلب به این روش پرداخته می شود.



- ✓ این روشها بر اساس روابط دینامیکی بین سرعت و دیگر متغیرهای ماشین از جمله شار، ولتاژ و جریان استاتور استوار است.
- ✓ این روشها فقط از اندازه گیری ولتاژ و جریان استاتور استفاده می کنند.

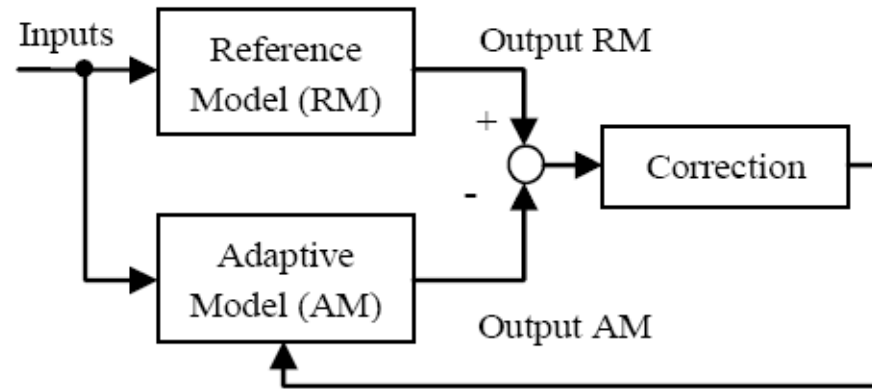
➤ **معایب این روشها:**

- ✓ روشهای حلقه باز وابستگی شدیدی به پارامترهای موتور دارند و با تغییر پارامترهای ماشین، این روشها دچار خطای فاحش تخمین در حالت گذرا و ماندگار می گردند که باید جبرانسازی شوند.
- ✓ پارامترهای اشاره شده، شامل مقاومتیهای روتور و استاتور، اندوکتانسهای روتور و استاتور و اندوکتانس مغناطیس کنندگی هستند.
- ✓ افزایش درجه حرارت بر مقادیر مقاومتها اثر می گذارد و اشباع ماشین بر مقادیر اندوکتانسها اثرگذار است.

➤ **مزیت این روشها: سادگی**

✓ این روشها اغلب بر مبنای رویتگرها (Observer) هستند و در آنها از یک مکانیزم خطای تخمین برگشتی برای کاهش خطای تخمین استفاده می شود.

✓ اغلب این رویتگرها از روش سیستم تطبیقی مدل مرجع (MRAS) برای تصحیح خطای تخمین استفاده می کنند.



بلوک دیاگرام کلی یک رویتگر حلقه بسته بر مبنای MRAS

✓ مدل مرجع (RM): مدلی از موتور است که وابستگی به پارامترهای مجهول (سرعت/موقعیت) ندارد.

✓ مدل تطبیقی (AM): مدلی از موتور است که پارامترهای مجهول در روابط دینامیکی آن وجود دارند.

✓ بلوک تصحیح (Correction): از خطای بین دو مدل RM و AM برای تصحیح مدل تطبیقی و تخمین پارامتر مجهول استفاده می کند.

✓ از مزایای روشهای تخمین حلقه بسته می توان به پاسخ دینامیکی سریع، مقاومت در برابر تغییرات برخی پارامترها، و تصحیح

خطای تخمین نام برد.

✓ همانطور که اشاره شد، روشهای تخمین حلقه بسته (روئیتگرها) به دو دسته مرتبه کامل و مرتبه کاهش یافته تقسیم بندی می شوند:

➤ روئیتگرهای مرتبه کاهش یافته:

- در این نوع روئیتگرها، معادلات دینامیکی بخش مکانیکی موتور (معادلات حرکت روتور) در معادلات دینامیکی مدل تطبیقی ظاهر نمی شود.
- مثلاً ورودیهای دو مدل می تواند ولتاژ استاتور باشد. خروجی های هر دو مدل می تواند جریان (روئیتگر جریان) و یا شار استاتور (روئیتگر شار) باشند.
- پس از تخمین جریان یا شار، و با استفاده از روابط موجود، ولتاژ ضدمحرکه تخمین زده شده و مقدار موقعیت و سرعت بدست می آیند.

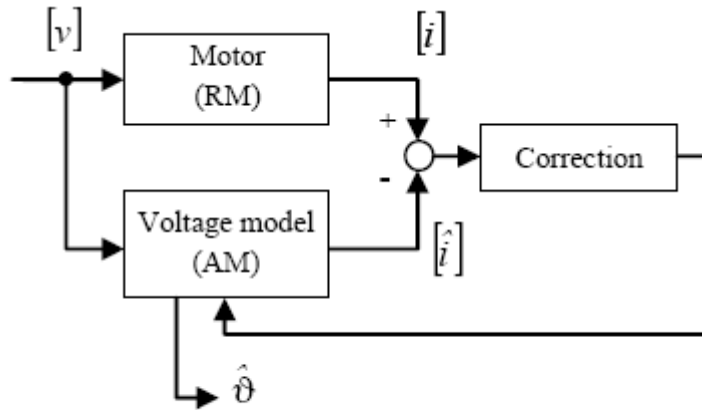


Fig. 6. Reduced-order current observer

➤ رویتگرهای مرتبه کامل:

- در این نوع رویتگرها، معادلات دینامیکی بخش مکانیکی موتور (معادلات حرکت روتور) در معادلات دینامیکی مدل تطبیقی ظاهر می شوند.
- به عبارت دیگر موقعیت و سرعت به عنوان یک متغیر حالت در معادلات رویتگر ظاهر می شوند و نیازی به محاسبه موقعیت و سرعت از روی روابط اضافه تر نمی باشد.

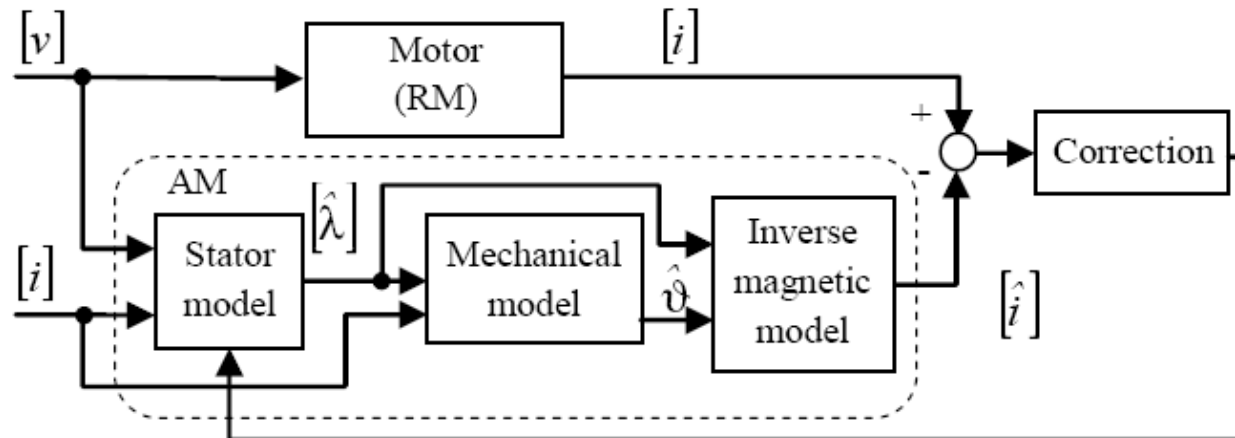


Fig. 9. Full-order observer with mechanical model

✓ اینکه مدل تطبیقی و یا مدل مرجع چه هست و از چه مکانیزم تطبیقی استفاده می شود، بستگی به نوع موتور دارد که در ادامه فصل سعی می شود، بطور مختصر و مفید بیان گردد.



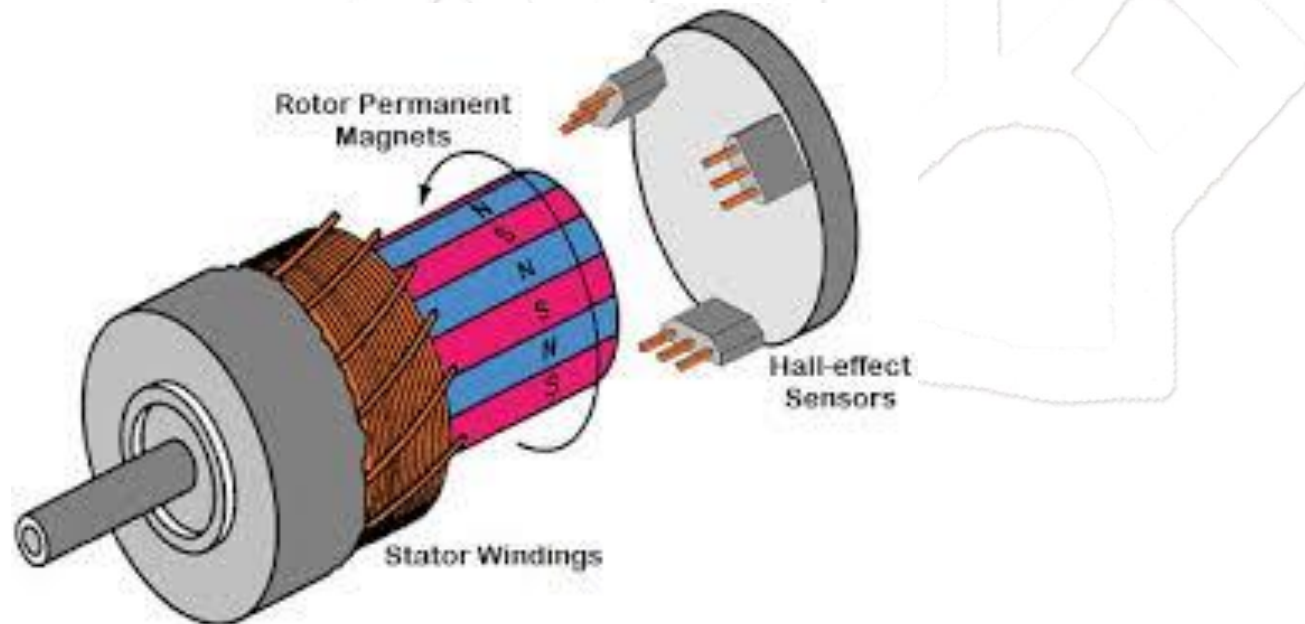


# روش های کنترل بدون حسگر

## موتورهای BLDC



- ✓ موتور BLDC برای کنترل حلقه بسته به روشهای متداول خود نیازی به سنسورهای سرعت/موقعیت گران نظیر اینکودر و رزولور ندارد، و اینکار را به کمک سه حسگر ارزان قیمت موقعیت اثرهال انجام می دهد.
- ✓ لذا استفاده از روشهای کنترل سنسورلس برای موتور BLDC جنبه اقتصادی از لحاظ خرید سنسور سرعت ندارد.
- ✓ عاملی که سبب رویکرد به روشهای سنسورلس برای موتورهای BLDC می شود، افزایش قابلیت اطمینان درایو است.
- ✓ در کاربردهای خاص، کنترل سنسورلس در مورد موتورهای BLDC با بحث کنترل در حضور خطا (Fault tolerant) مربوط است.





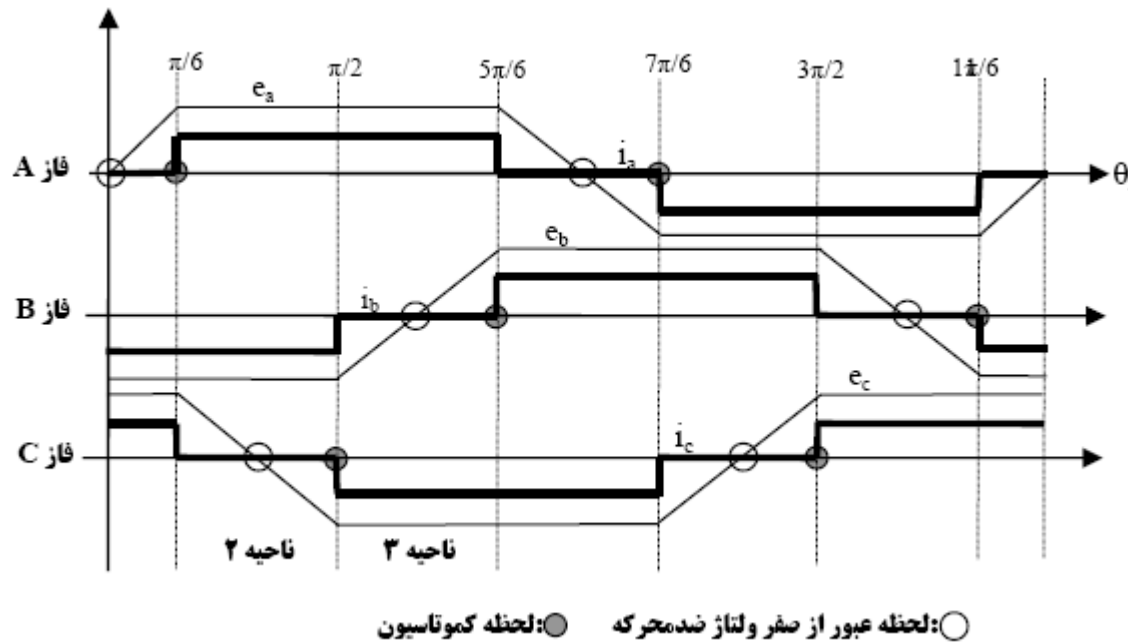
- ✓ موتورهای BLDC با توجه به آنکه دارای شکل موج ولتاژ ضدمحرکه غیر سینوسی هستند، بسیاری از روشهای بر مبنای مدل موتور در مورد آنها کارآیی مطلوب را ندارد.
- ✓ لذا در کنترل سنسورلس موتورهای BLDC، اغلب از روش های حلقه باز استفاده می شود.

## ➤ انواع روشهای تخمین موقعیت ارائه شده برای درایو موتور BLDC:

- ۱- روشهای بر مبنای ولتاژ ضدمحرکه (حلقه باز)
- ۲- تخمین شار پیوندی استاتور (حلقه باز)
- ۳- استفاده از تغییرات اندوکتانس استاتور (حلقه باز)
- ۴- استفاده از توابع مناسبی از ولتاژ و جریان (حلقه باز)
- ۵- استفاده از رویتگرها (حلقه بسته)



✓ در این روشها با توجه به وجود اختلاف فاز ۳۰ درجه بین نقطه عبور از صفر (ZCP) ولتاژ ضد محرکه فاز و لحظه کموتاسیون، نقاط عبور از صفر ولتاژهای ضد محرکه تشخیص داده می شوند و از آنها برای تعیین لحظات کموتاسیون جریان فازها استفاده می گردد.



نقاط عبور از صفر ولتاژ ضد محرکه فازها و ارتباط آن با لحظات کموتاسیون

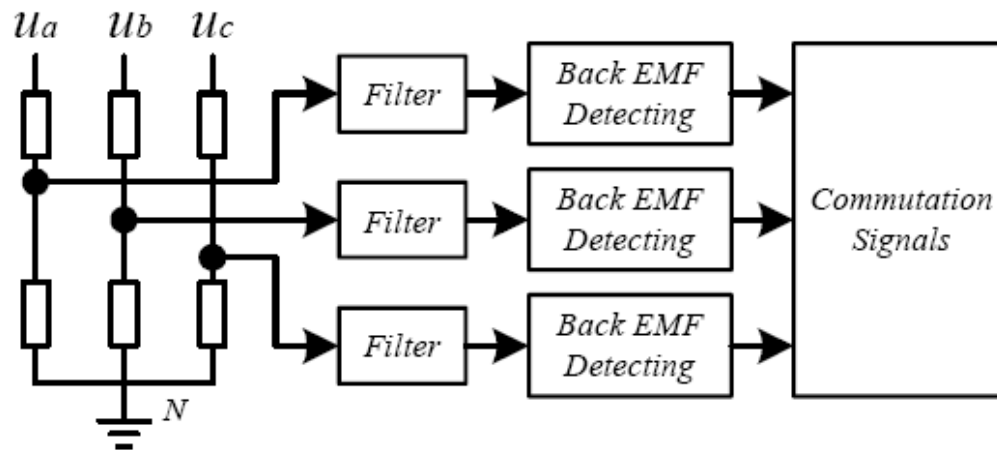
انواع مختلف این دسته از روشها:

- ۱- اندازه گیری ولتاژ ترمینال استاتور
- ۲- اندازه گیری هارمونیک سوم ولتاژ ضد محرکه
- ۳- اندازه گیری جریان دیویدهای هرزه گرد
- ۴- انتگرال گیری از ولتاژ ضد محرکه

- ✓ در موتور BLDC سه فاز برخلاف موتورهای القایی و سنکرون، در غیر از لحظات کموتاسیون جریان فقط از دو فاز موتور عبور می نماید و جریان فاز سوم (فاز خاموش) صفر است می توان با اندازه گیری ولتاژ ترمینال استاتور نسبت به نقطه ستاره موتور، مقدار ولتاژ ضدمحرکه فاز خاموش را تعیین نمود.
- ✓ به عنوان مثال به فرض قرار داشتن موتور در ناحیه دوم کاری که جریان فاز a مثبت، جریان فاز b منفی و جریان فاز c صفر است و برای تغییر ناحیه کاری به ناحیه سوم، می توان ولتاژ ترمینال فاز c (فاز خاموش) نسبت به نقطه ستاره را اندازه گیری نمود. زمانی که این ولتاژ صفر شود، ولتاژ ضدمحرکه فاز c از سطح صفر ولت عبور نموده است. با دانستن سرعت موتور و ایجاد زمان تاخیر معادل با ۳۰ درجه الکتریکی، لحظه کموتاسیون جریان به دست می آید.

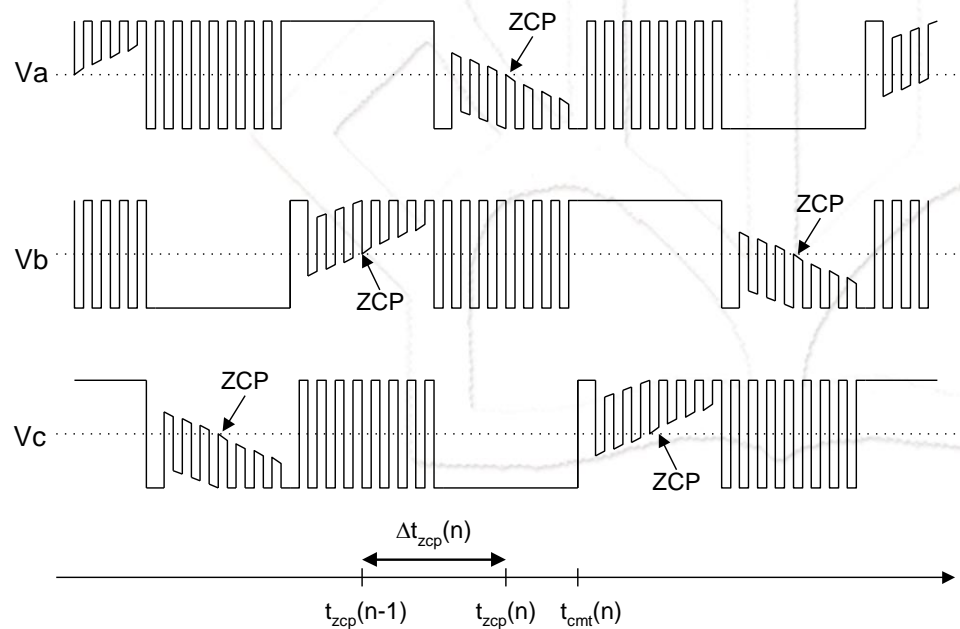
لذا این روش شامل سه مرحله اصلی زیر است:

- الف- اندازه گیری ولتاژ فاز نسبت به نقطه ستاره موتور
- ب- تعیین نقطه گذر از صفر
- ج- شیفت فاز ۳۰ درجه



- ✓ در حالت عملی به دلیل در دسترس نبودن ولتاژ نقطه ستاره موتور از یک اتصال ستاره متعادل مقاومتی برای اندازه گیری ولتاژ ترمینالها و ایجاد نقطه ستاره مجازی استفاده می شود.

- ✓ شکل زیر اندازه گیری ولتاژهای ترمینال موتور BLDC در حالت واقعی وقتی که از روش ولتاژ PWM برای کنترل جریان موتور استفاده می شود را نمایش می دهد. برای حذف اثرات سوئیچینگ فرکانس بالا از ولتاژ ترمینال فاز خاموش که از طریق ولتاژ نقطه ستاره موتور به ولتاژ ترمینال فاز خاموش منتقل می شود، این ولتاژ ابتدا از یک فیلتر پائین گذر یا میان گذر مناسب عبور داده شده و سپس به وسیله مبدل های آنالوگ به دیجیتال اندازه گیری می گردد.
- ✓ به دلیل ناچیز بودن مقدار ولتاژ ضدمحرکه در حالت ایستادن و سرعت های پائین، از روش مذکور نمی توان در ناحیه سرعت پائین، زمان های عبور از صفر و یا لحظات کموتاسیون را تخمین زد.



تعیین نقطه عبور از صفر (ZCP) با اندازه گیری ولتاژ PWM ترمینال فاز خاموش



### مشکلات این روش:

- ۱- کاهش دامنه ولتاژ ضدمحرکه در سرعتهای پائین
- ۲- وجود نویزهای ولتاژ سوئیچینگ
- ۳- خطاهای ناشی از فیلتر نمودن ولتاژ
- ۴- خطای ناشی از ولتاژ غیر صفر نقطه ستاره

### اهم کارهای انجام شده در روش اندازه گیری ولتاژ ترمینال استاتور (تا ۲۰۰۷):

- Shao (۲۰۰۲) در [52]: تعیین گذر از صفر ولتاژهای ضدمحرکه فازها با فیلتر نمودن ولتاژ ترمینال
- Shao (۲۰۰۳) در [55]: اندازه گیری نقطه گذر از صفر در حالت صفر بودن فرمان PWM (حذف فیلتر)
- Cheng (۲۰۰۲) در [58]: شیفت دهنده فاز ۳۰ درجه مستقل از فرکانس
- McKeever (۲۰۰۵) در [59]: استفاده از Look-up table برای جبران سازی تاخیر فاز فیلترها
- Soong (۲۰۰۴) در [60]: تخمین ولتاژ نقطه ستاره به وسیله یک رویتگر و تصحیح خطای تخمین
- Zhou (۲۰۰۵) در [61]: تعیین نقاط گذر از صفر بدون استفاده از نقطه ستاره و تصحیح در حالت جریان ناپیوسته
- Kang (۲۰۰۶) در [62]: ارائه یک راه حل تحلیلی برای تعیین نقاط گذر از صفر ولتاژهای ضدمحرکه و بدون فیلتر
- Zhang (۲۰۰۶) در [63]: اندازه گیری تنها ولتاژ یک فاز نسبت به باس DC و شیفت ۳۰ درجه
- Wang (۲۰۰۷) در [65]: برای کاربردهای توان پائین، این روش را به صورت مدار مجتمع در آورده است.



## □ روش های بر مبنای ولتاژ ضدمحرکه

➤ اندازه گیری هارمونیک سوم ولتاژ ضدمحرکه

✓ در این روش از هارمونیک سوم ولتاژ ضدمحرکه برای تعیین زمانهای کلیدزنی در حالت عملکرد موتور BLDC با بازه هدایت ۱۲۰ درجه استفاده می شود.

✓ معادلات ولتاژ ترمینال موتور BLDC به صورت ذیل قابل نمایش هستند:

$$v_{an} = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a$$

$$v_{bn} = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b \quad (1)$$

$$v_{cn} = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c$$

✓ ولتاژهای ضدمحرکه در رابطه فوق را می توان با استفاده از بسط فوریه شان، بصورت ذیل بیان نمود:

$$e_a = E_1 \sin \theta_r + E_3 \sin 3\theta_r + E_5 \sin 5\theta_r + E_7 \sin 7\theta_r + \dots$$

$$e_b = E_1 \sin \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) + E_3 \sin 3 \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) + E_5 \sin 5 \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) + E_7 \sin 7 \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) + \dots \quad (2)$$

$$e_c = E_1 \sin \left( \theta_r - \frac{4\pi}{3} \right) + E_3 \sin 3 \left( \theta_r - \frac{4\pi}{3} \right) + E_5 \sin 5 \left( \theta_r - \frac{4\pi}{3} \right) + E_7 \sin 7 \left( \theta_r - \frac{4\pi}{3} \right) + \dots$$



✓ جمع سه ولتاژ ضدمحر که داده شده عبارتست از:

$$e_a + e_b + e_c = 3E_3 \sin 3\theta_r + 3E_9 \sin 9\theta_r + 3E_{15} \sin 15\theta_r + \dots \approx 3E_3 \sin 3\theta_r \quad (3)$$

✓ از جمع ولتاژهای ترمینال و جایگزینی مجموع سه ولتاژ ضدمحر که و مطابق روابط (۲) و (۳) داریم:

$$V_{\text{summed}} = v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = \left( R + L \frac{d}{dt} \right) (i_a + i_b + i_c) + (e_a + e_b + e_c) = e_a + e_b + e_c \approx 3E_3 \sin 3\theta_r \quad (4)$$

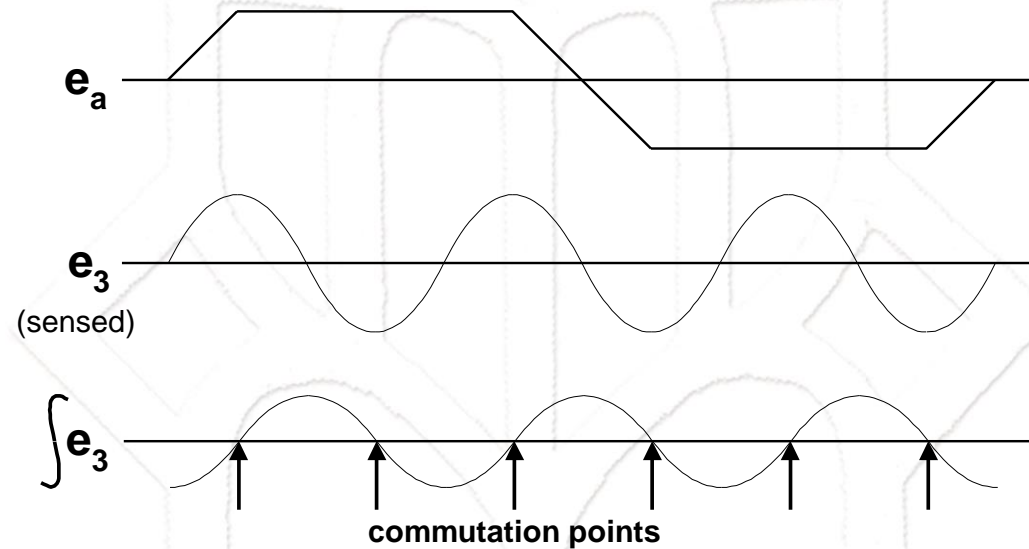
✓ از رابطه (۴)، با فرض صفر بودن مجموع جریانها، مجموع ولتاژهای ترمینال فقط شامل مضارب هارمونیک سوم ولتاژ ضدمحر که فاز a خواهد بود.

✓ بخش هارمونیک سوم بر هارمونیکهای بالاتر غالب بوده که در نتیجه می توان این مجموع را برابر با هارمونیک سوم ولتاژ ضدمحر که دانست.

✓ برای تعیین لحظات کلیدزنی، از سیگنال ولتاژ فیلتر شده که مولفه هارمونیک سوم ولتاژ ضدمحر که می باشد، انتگرال گرفته می شود تا مطابق رابطه (۵)، شار هارمونیک سوم بدست آید:

$$\lambda_{3rd} = \int V_{\text{summed}} dt \quad (5)$$

- ✓ مطابق شکل زیر، شار نشتی هارمونیک سوم، به اندازه ۳۰ درجه الکتریکی از هارمونیک سوم ولتاژ ضدمحرکه و همچنین به اندازه ۳۰ درجه از ولتاژ ضدمحرکه فاز  $a$  تاخیر فاز دارد.
- ✓ لذا نقاط عبور از صفر هارمونیک سوم شار نشتی منطبق بر نقاط کموتاسیون فازهای موتور BLDC خواهند بود.



هارمونیک سوم ولتاژ ضدمحرکه و زمانهای کموتاسیون

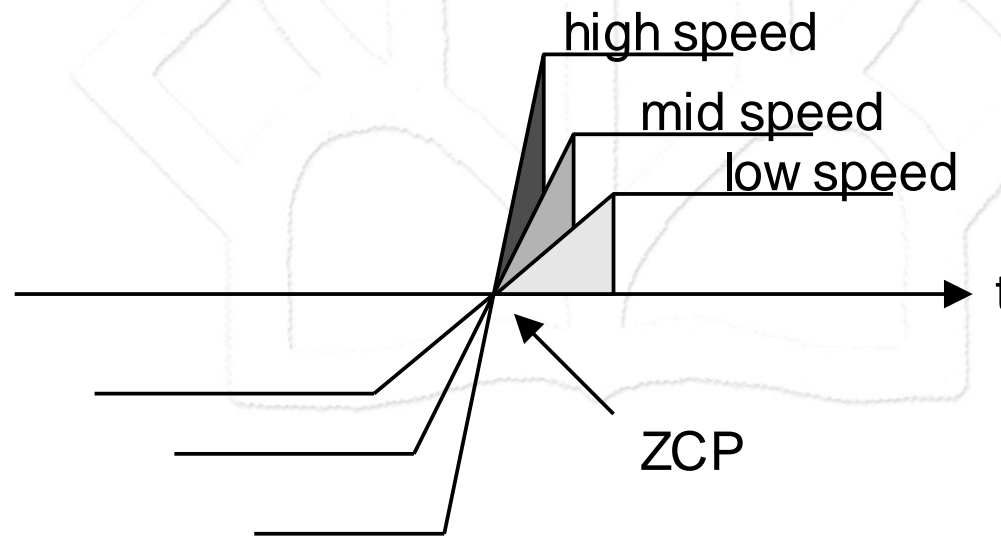
- ✓ روش هارمونیک سوم محدوده کاری وسیع تری نسبت به روش اندازه گیری ولتاژ ترمینال دارد (100-6000 RPM).
- ✓ همچنین تاخیر فاز ناشی از فیلترینگ، در این روش نسبت به روش قبل کمتر بوده و لذا خطای اندازه گیری کمتر است.
- ✓ با این وجود در سرعتهای پائین به دلیل بازه زمانی وسیع، انتگرال گیری می تواند منجر به ایجاد خطاهای قابل ملاحظه ای شود. همچنین در این سرعتها، دامنه سیگنال هارمونیک سوم کوچک است.



## □ روش های بر مبنای ولتاژ ضدمحرکه

### ➤ روش انتگرال گیری از ولتاژ ضدمحرکه

- ✓ در این روش، زمان کموتاسیون با انتگرال گیری از ولتاژ فاز خاموش تعیین می شود.
- ✓ ایده این روش بر این مبنا استوار است که مقدار انتگرال گرفته شده از ولتاژ ضدمحرکه در بازه زمانی کموتاسیون برای تمامی مقادیر سرعت یکسان است. این مطلب در شکل زیر نشان داده شده است.
- ✓ انتگرال گیری زمانی آغاز می شود که ولتاژ ضدمحرکه فاز خاموش از صفر عبور نماید. یک مقدار آستانه برای توقف عمل انتگرال گیری که زمان این توقف متناظر با زمان کموتاسیون است، در نظر گرفته می شود.



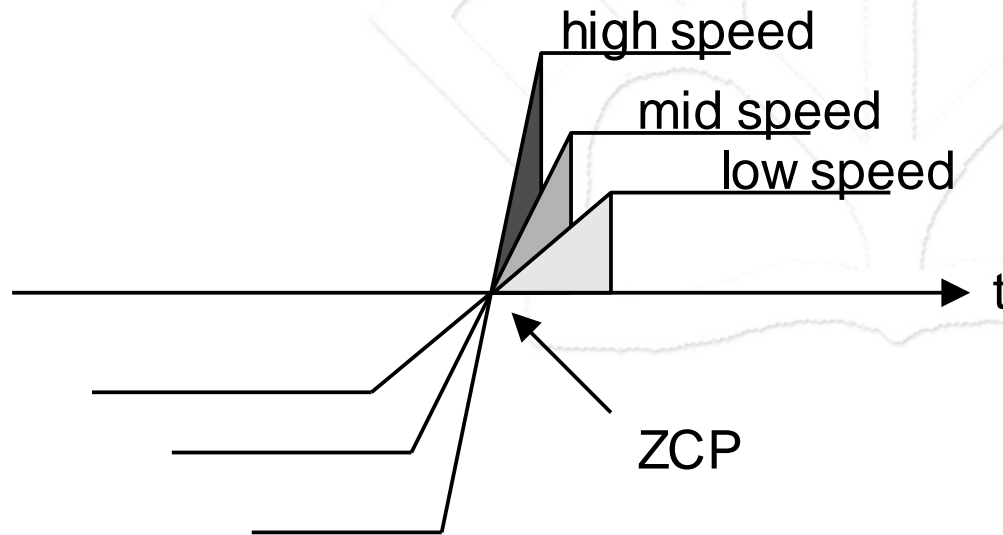
ناحیه انتگرال گیری از ولتاژ ضدمحرکه



## □ روش های بر مبنای ولتاژ ضدمحرکه

### ➤ روش انتگرال گیری از ولتاژ ضدمحرکه

- ✓ با فرض دوزنقه ایی بودن ولتاژ ضدمحرکه و تغییرات خطی آن از مقادیر منفی تا مثبت، ولتاژ آستانه را برای تمام مقادیر سرعت ثابت در نظر می گیریم.
- ✓ زاویه پیش فازی جریان را می توان در صورت نیاز، توسط تغییر مقدار آستانه در نظر گرفته شده ایجاد نمود.
- ✓ روش انتگرال گیری به نویز ناشی از سوئیچینگ کمتر حساس بوده و بصورت اتوماتیک خود را با تغییرات سرعت تنظیم می کند، اما عملکرد سرعت پائین آن بدلیل مشکل جمع شدن خطاها، ضعیف است.



ناحیه انتگرال گیری از ولتاژ ضدمحرکه





- ✓ روشهای مورد بررسی قرار گرفته در بخشهای قبل از نوع حلقه باز و بر مبنای اندازه گیری سیگنال بودند و اغلب آنها هم فقط ۶ نقطه از ۳۶۰ درجه متناظر با ۶ نقطه کموتاسیون را مشخص می کردند.
- ✓ در استفاده از برخی روشهای کنترلی برای موتورهای BLDC، نیازمند دانستن اطلاعات کامل موقعیت روتور یعنی کل بازه ۳۶۰ درجه می باشد که بر یا این منظور از روئیتگرها استفاده می شود.
- ✓ این روشها اغلب از مدل دینامیکی موتور استفاده می کنند و روشهای تخمین حلقه بسته هستند و دقت و مقاومت بیشتری نسبت به روشهای حلقه باز تخمین دارند.

✓ این روشها به ۵ دسته کلی ذیل تقسیم بندی می شوند:

- روئیتگر لیونبرگر (Luennerger Observer)
- روئیتگر مود لغزشی (Sliding Mode Observer)
- فیلتر کالمن توسعه یافته (Extended Kalman Filter)
- سیستمهای تطبیقی مدل مرجع (Adaptive Model Reference Systems (MRAS)
- روشهای هوشمند (سیستمهای فازی، شبکه های عصبی، ...)

- ✓ با توجه به اینکه در روشهای متداول کنترلی موتورهای BLDC، تنها ۶ نقطه کموتاسیون مورد نیاز هست و موقعیتهای دیگر روتور مورد نیاز نیستند از روئیتگرها، کمتر برای کنترل حلقه بسته موتور BLDC به روش کنترل جریان مربعی استفاده می شود.
- ✓ از روئیتگرها بیشتر برای تخمین موقعیت و سرعت موتورهای PMSM یا براسلس AC استفاده می گردد.



## □ راه اندازی موتور BLDC در روشهای بدون حسگر

- ✓ موتور BLDC یک موتور خود راه انداز نیست و در تمامی روش های کنترل با حسگر موقعیت، راه اندازی درست موتور و ایجاد گشتاور مناسب، مستلزم معلوم بودن موقعیت اولیه روتور می باشد که حسگرهای موقعیت اثر هال این امکان را فراهم می آورند.
- ✓ از طرف دیگر روش های کنترل بدون حسگر موقعیت نیز خود راه انداز نبوده و نیاز به دانستن موقعیت اولیه روتور دارند.
- ✓ تعیین موقعیت اولیه روتور در موتورهایی که با گردش روتور، رلوکتانس فاصله هوایی به قدر کافی تغییر می کند به راحتی امکان پذیر است. اما در موتورهای BLDC که تغییرات رلوکتانس فاصله هوایی ناچیزی دارند تخمین موقعیت اولیه رتور امکان پذیر نمی باشد.
- ✓ در این حالت بهترین راه حل آن است که روتور در یک موقعیت دانسته شده قرار گرفته (و به اصطلاح جهت دهی گردد) و سپس راه اندازی موتور از این موقعیت اولیه معلوم انجام شود. در این روش با تحریک دو فاز استاتور، روتور در یک نقطه تعادل قرار می گیرد.
- ✓ سپس یک میدان دوار با تحریک متناوب فازهای استاتور و با فرکانسی مناسب ایجاد می شود به نحوی که روتور بتواند با غلبه بر اصطکاک و اینرسی خود شتاب گرفته و به یک سرعت حداقلی برای اعمال روش کنترل بدون حسگر برسد. سپس با استفاده از حسگرهای مجازی اثر هال تخمین زده شده، کنترل موتور به روش کنترل بدون حسگر تغییر می یابد.
- ✓ این روش راه اندازی موتور BLDC، روش حلقه باز نام دارد.



## □ راه اندازی موتور BLDC در روشهای بدون حسگر

➤ راه اندازی به روش کنترل حلقه باز

✓ روش راه اندازی حلقه باز موتور BLDC، شامل سه مرحله ذیل است:

- جهت دهی روتور در یک موقعیت معلوم با تحریک مناسب دو فاز موتور.
- تحریک متوالی فازهای موتور با فرکانس مناسب از موقعیت اولیه فوق مطابق با جدول کموتاسیون.
- تغییر روش کنترلی به روش کنترل بدون حسگر پس از رسیدن سرعت موتور به یک مقدار حداقلی.

✓ در روش راه اندازی حلقه باز، تنظیم سرعت موتور غیرممکن است اما تنظیم جریان فازها با استفاده از کنترل کننده های جریان امکان پذیر می باشد.

✓ در حالت جهت دهی روتور مقدار جریان مرجع باید به درستی انتخاب شود تا از نوسانی شدن موتور حول نقطه تعادل جلوگیری گردد.

✓ همچنین در هنگام شتاب گیری روتور، مقدار مرجع جریان می تواند در مقدار حداکثر قرار گیرد تا زمان شتاب گیری روتور به حداقل برسد.

✓ مدت زمان اعمال جریان در هنگام جهت دهی روتور و فرکانس میدان دوار در حالت شتاب گیری باید به درستی انتخاب شوند.

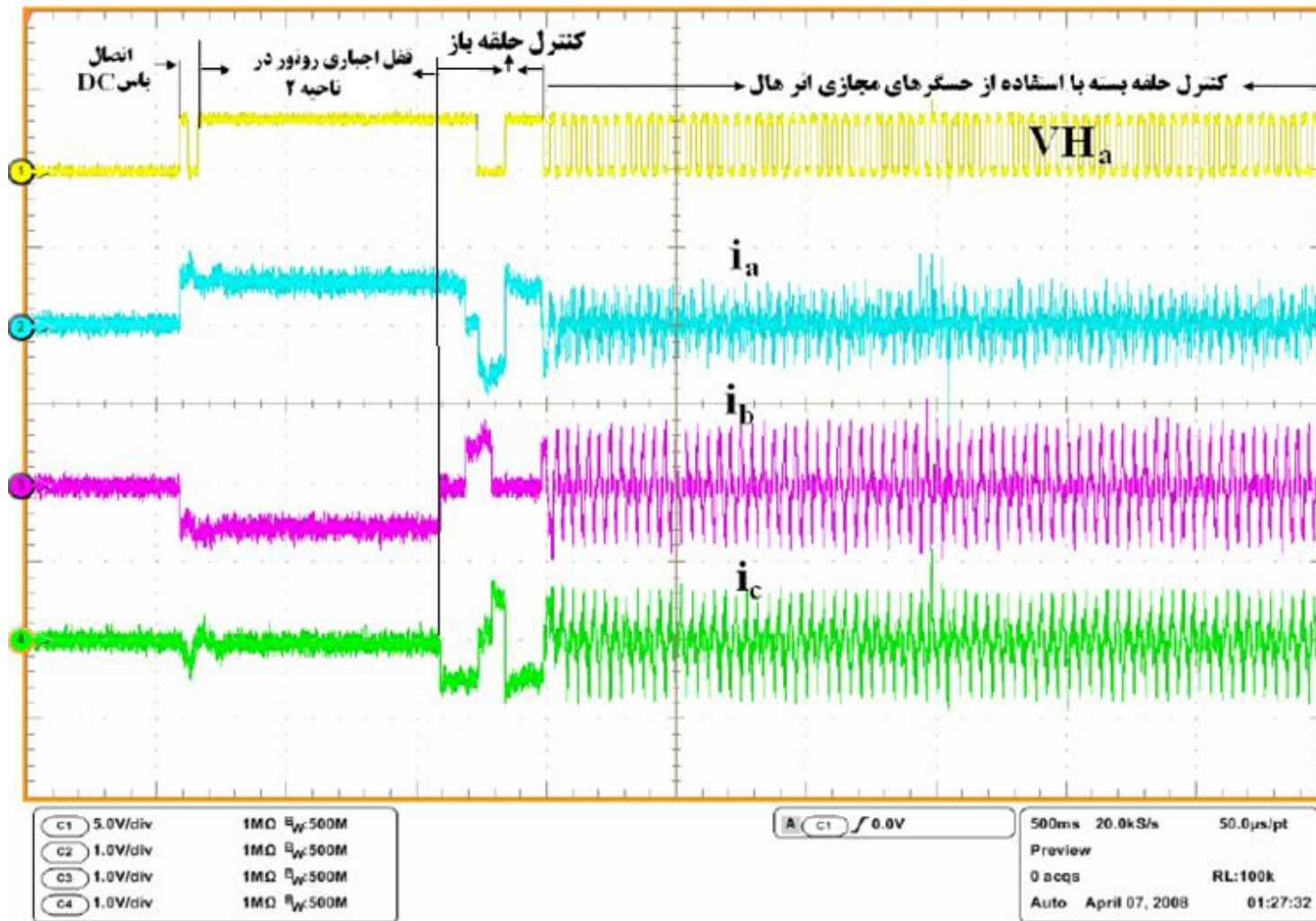
✓ از عیوب اصلی روش راه اندازی حلقه باز آن است که در هنگام جهت دهی روتور، ممکن است روتور در جهت عکس بچرخد که البته می توان نشان داد مقدار این چرخش کمتر از ۱۸۰ درجه الکتریکی است. اگر در یک کاربرد، حتی این مقدار ناچیز چرخش در جهت عکس نیز مجاز نباشد، باید راهکار مناسب اندیشیده شود.



# □ راه اندازی موتور BLDC در روشهای بدون حسگر

➤ راه اندازی به روش کنترل حلقه باز

✓ شکل زیر تغییرات جریان فازها و موقعیت تخمین زده شده روتور را در طی راه اندازی یک موتور BLDC واقعی به روش کنترل حلقه باز را نشان می دهد.

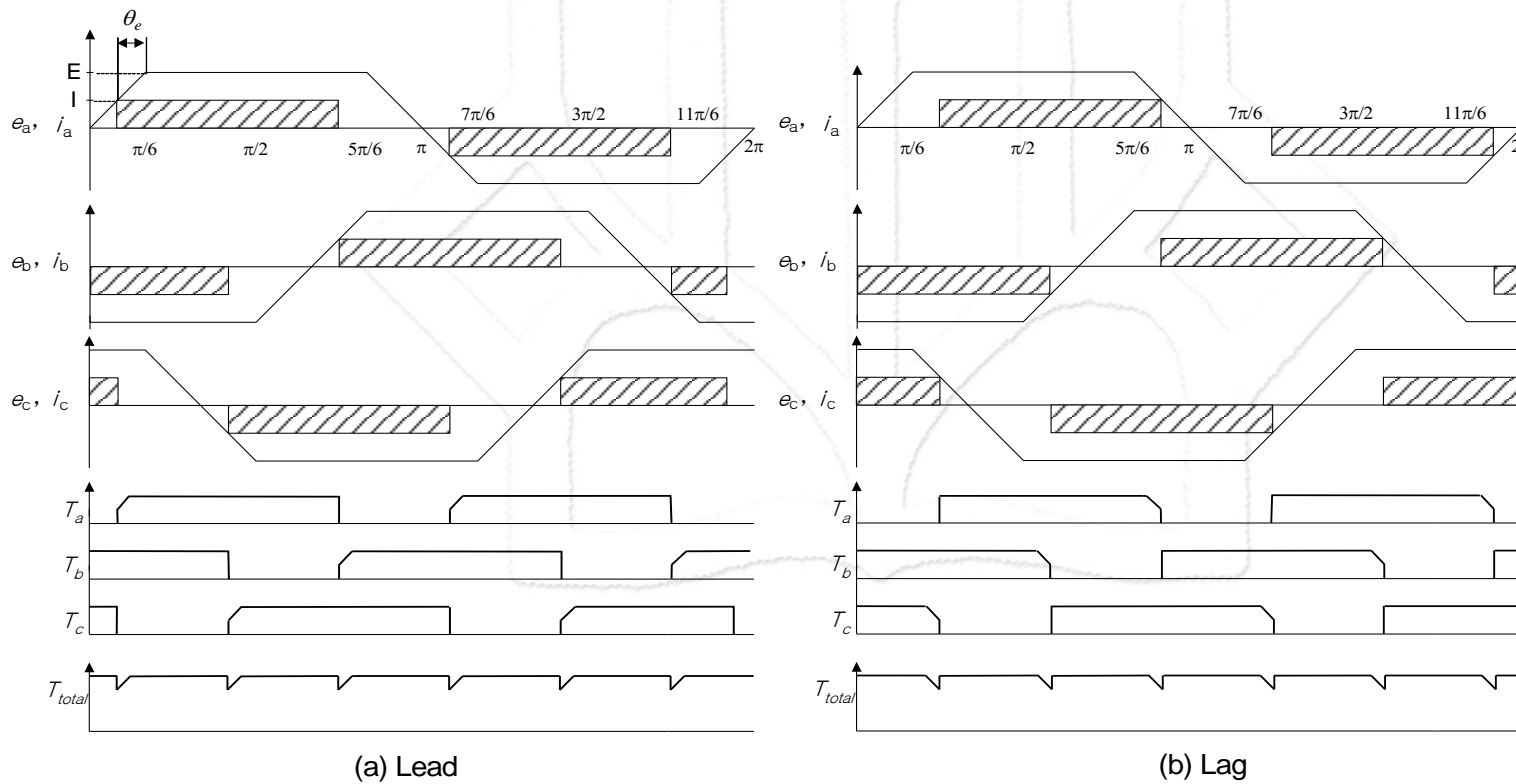




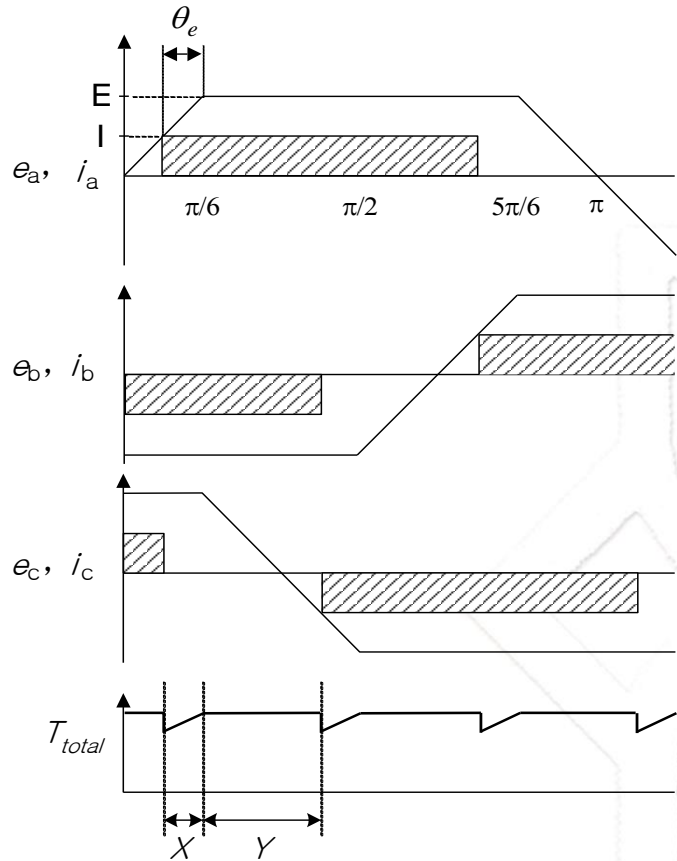


- ✓ خطای تخمین وضعیت در یک سیستم آزمایشگاهی با مسائل ذیل مرتبط است:
  - خطاهای اندازه گیری
  - خطاهای پارامترهای موتور به دلیل مشکلات ساخت و یا تغییر دما
  - نرخ نمونه برداری محدود
- ✓ دقت ولتاژها و جریانهای اندازه گیری شده یا تخمین زده شده تاثیر مستقیمی بر الگوریتم تخمین وضعیت ارائه شده دارد.
- ✓ در حالتی واقعی، تغییرات اندوکتانس کوچکی مرتبط با نقایص مربوط به ساخت موتور، شار نشتی و اشباع محلی شار وجود دارد. همچنین مقدار مقاومت فاز می تواند با افزایش دما تغییر نماید.

- ✓ خطای تخمین روتور اثر مستقیمی بر ریپل گشتاور داشته و سبب کاهش راندمان درایو موتور BLDC می گردد.
- ✓ در شکل زیر فرض می شود که خطای کموتاسیون  $15^\circ$  است. بدلیل خطای زاویه کموتاسیون، جریانهای فازها نسبت به ولتاژهای ضدمحرکه متناظر پیشفاز یا پسفاز می شوند.
- ✓ نتایج خطای کموتاسیون عبارتند از افزایش ریپل گشتاور، کاهش گشتاور متوسط و لذا کاهش نسبت گشتاور بر آمپر درایو. در نتیجه ما شاهد کاهش راندمان درایو خواهیم بود.



اثر خطای تخمین روتور بر گشتاور کل تولید شده



✓ گشتاور و توان در حالت کلی عبارتند از:

$$T = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_r} \quad (6)$$

$$P = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (7)$$

✓ در حالت بدون خطای تخمین، مقدار توان متوسط برابرست با:

$$P_{avg} = 2EI \quad (8)$$

✓ در حالت وجود خطای تخمین و با استفاده از شکل مقابل داریم:

$$P = 2 \cdot E \cdot I - \left(\frac{3}{\pi}\right)^2 \cdot E \cdot I \cdot \theta_e^2 \quad (9)$$

✓ در نتیجه راندمان در حالت وجود خطا از رابطه زیر بدست می آید:

$$\eta = \eta_1 \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{3 \cdot |\theta_e|}{\pi}\right)^2\right) \quad (10)$$

که در آن  $\eta_1$  راندمان موتور در حالتی است که هیچگونه خطای کموتاسیونی وجود ندارد.



# تحلیل خطای تخمین در روشهای کنترل بدون حسگر موتور BLDC

➤ اثر خطا بر کاهش بهره و گشتاور

جدول زیر رابطه گشتاور و راندمان موتور را بر حسب مقادیر مختلف خطای کموتاسیون نشان می دهد.

گشتاور موتور	$0 \leq  \theta_e  \leq \frac{\pi}{3}$	$2 \cdot k_e \cdot I - \left(\frac{3}{\pi}\right)^2 \cdot k_e \cdot I \cdot  \theta_e ^2$
	$\frac{\pi}{3} <  \theta_e  \leq \frac{2\pi}{3}$	$\left(\frac{3}{\pi}\right) \cdot k_e \cdot I \cdot (\pi - 2 \cdot  \theta_e )$
راندمان موتور	$0 \leq  \theta_e  \leq \frac{\pi}{3}$	$\eta = \eta_1 \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{3 \cdot  \theta_e }{\pi}\right)^2\right)$
	$\frac{\pi}{3} <  \theta_e  \leq \frac{2\pi}{3}$	$\eta = \eta_1 \cdot \left(\frac{3}{2} - \frac{3 \cdot  \theta_e }{\pi}\right)$

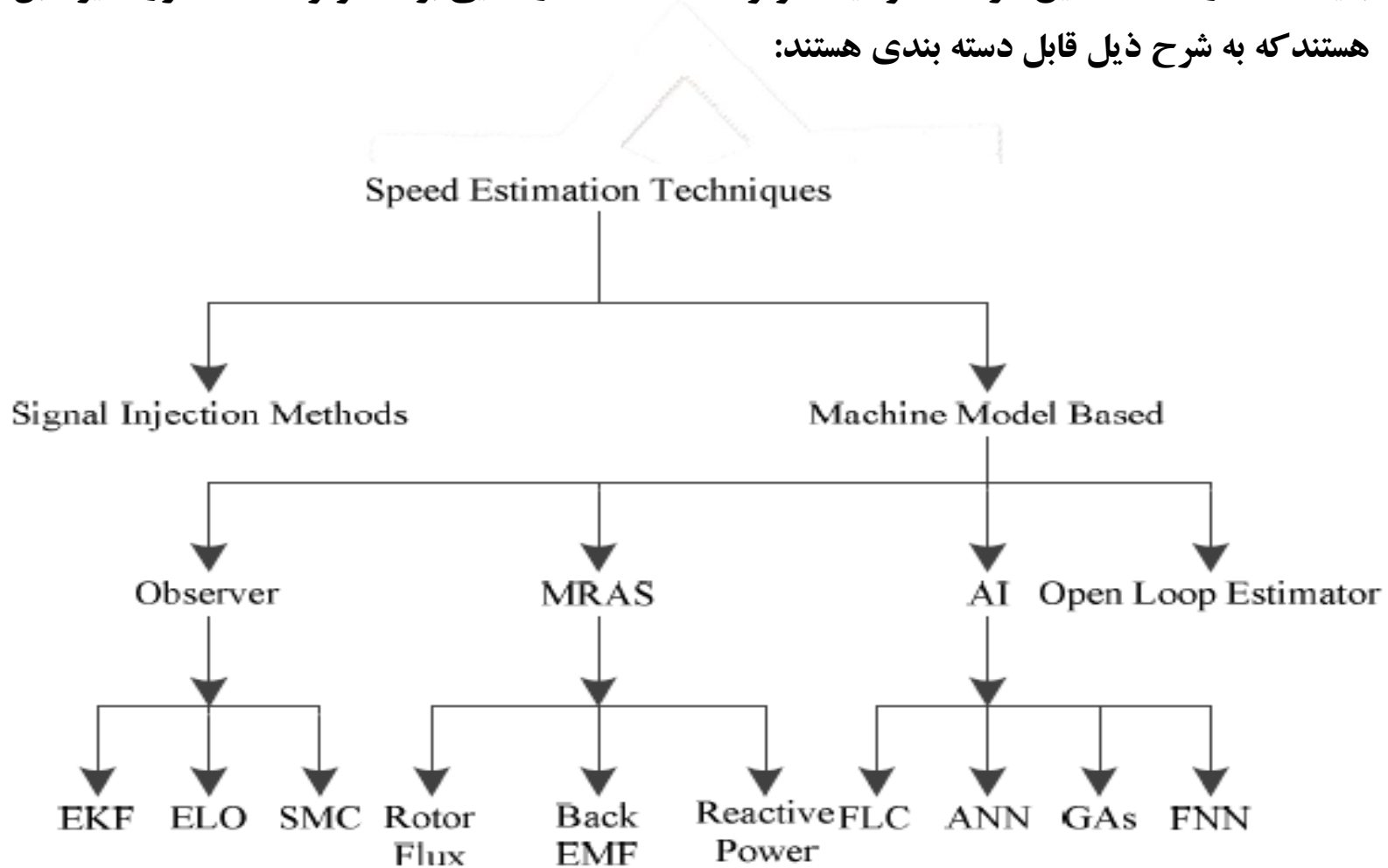


# روش های کنترل بدون حسگر

## موتورهای *PMMSM*



✓ بسیاری از روشهای تخمین سرعت / موقعیت موتورهای BLDC و القایی برای موتورهای سنکرون نیز قابل کاربرد هستند که به شرح ذیل قابل دسته بندی هستند:

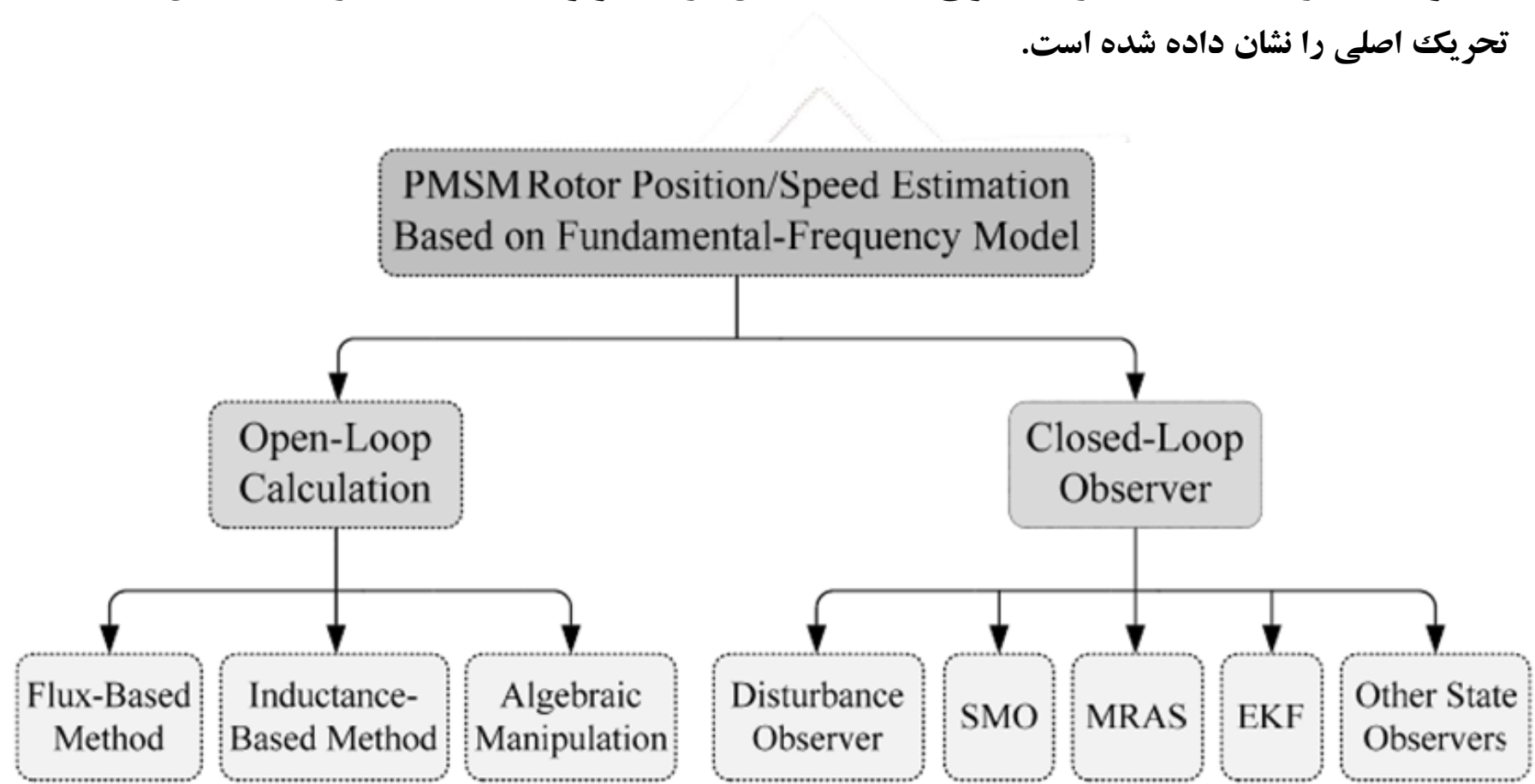




# □ کنترل بدون حسگر موتورهای PMSM

➤ انواع روشها

✓ در فلوجارت زیر، دسته بندی دیگری از انواع روشهای تخمین سرعت موتورهای PMSM بر مبنای تحلیل سیگنال تحریک اصلی را نشان داده شده است.



کلاسه بندی روشهای تخمین موقعیت/سرعت روتور در موتور PMSM بر مبنای تحلیل سیگنال تحریک اصلی





✓ این روشها به ۳ دسته کلی ذیل تقسیم بندی می شوند:

- تخمین بر مبنای شار پیوندی
- تخمین بر مبنای تغییرات اندوکتانس استاتور
- تخمین بر مبنای دیگر روابط ریاضی

✓ روشهای تخمین بر مبنای شار نیز دارای انواع متفاوتی هستند:

- تخمین بر مبنای شار پیوندی استاتور
- تخمین بر مبنای شار روتور





## □ کنترل بدون حسگر موتور PMSM

### ➤ تخمین موقعیت بر مبنای شار روتور

✓ برخی روشهای کنترلی نظیر کنترل برداری به موقعیت روتور (یا همان شار روتور) برای انجام تبدیل پارک و جهت دهی شار نیاز است که به طریق زیر بدست می آید:

○ مولفه های شار پیوندی استاتور در دستگاه دومحوری ساکن  $\alpha\beta$  از روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$\begin{cases} \psi_{s\alpha} = \int (v_\alpha - R_s i_\alpha) dt \\ \psi_{s\beta} = \int (v_\beta - R_s i_\beta) dt \end{cases} \quad (11)$$

○ همچنین مولفه های شار روتور در دستگاه دومحوری ساکن  $\alpha\beta$  نیز از روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$\begin{cases} \psi_{r\alpha} = \psi_{s\alpha} - L i_\alpha \\ \psi_{r\beta} = \psi_{s\beta} - L i_\beta \end{cases} \quad (12)$$

○ با توجه به رابطه ولتاژ-جریان زیر در دستگاه دومحوری ساکن  $\alpha\beta$  برای موتور PMSM

$$\begin{cases} v_\alpha = R_s i_\alpha + L \frac{d}{dt} i_\alpha - K_e \omega_e \sin \theta_{re} \\ v_\beta = R_s i_\beta + L \frac{d}{dt} i_\beta + K_e \omega_e \cos \theta_{re} \end{cases} \quad (13)$$

○ موقعیت روتور (یا شار روتور) از رابطه زیر قابل محاسبه است:

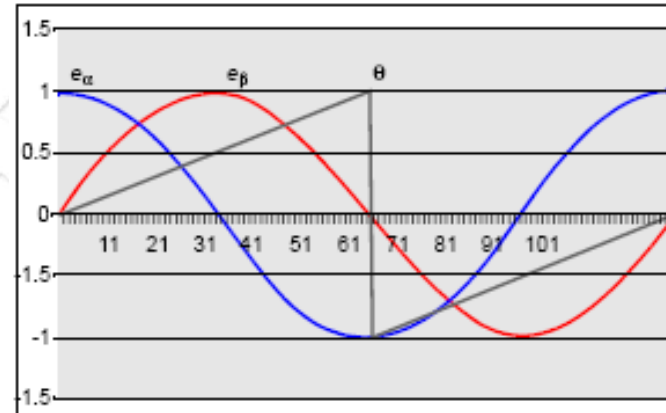
$$\theta_{re} = \tan^{-1}(\psi_{r\beta} / \psi_{r\alpha}) \quad (14)$$

○ سرعت روتور نیز با مشتق گیری از رابطه موقعیت روتور بدست می آید.

- در برخی مراجع از ولتاژهای ضد محر که موتور در دستگاه دوجوری ساکن  $\alpha\beta$  و از رابطه زیر نیز برای محاسبه موقعیت روتور استفاده شده است.

$$\theta = \arctan(e_\alpha/e_\beta) \quad (15)$$

$$\theta_{re} = \tan^{-1}(\psi_{r\beta}/\psi_{r\alpha}) \quad (16)$$



- با توجه به اینکه ممکن است در معادلات ولتاژ-جریان (۱۷) بخاطر گرما یا اشباع پارامترهای  $R_s$  و  $L$  تغییر نمایند، تخمین موقعیت یا سرعت ممکن است همراه با خطا باشد.

$$\begin{cases} v_\alpha = R_s i_\alpha + L \frac{d}{dt} i_\alpha - K_e \omega_e \sin \theta_{re} \\ v_\beta = R_s i_\beta + L \frac{d}{dt} i_\beta + K_e \omega_e \cos \theta_{re} \end{cases} \quad (17)$$

- برای رفع این مشکل، استفاده از رویتگرهای حلقه بسته، مشکل را حل می کند.



## □ کنترل بدون حسگر موتور PMSM

### ➤ تخمین موقعیت موتور PMSM با استفاده از روئیتگرها

- ✓ همانطور که قبلا هم اشاره شد، روشهای تخمین حلقه باز، علیرغم سادگی به دلیل حساسیت به تغییرات پارامترها و عملکرد ضعیف دینامیکی در موارد چندانی مناسب برای کنترل سنسورلس موتور PMSM نیستند.
- ✓ روشهای حلقه بسته بر مبنای روئیتگر دارای طیف وسیعی هستند و تحقیقات زیادی روی هر یک انجام شده است.

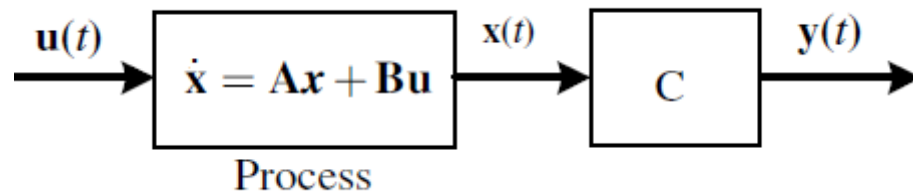
✓ این روشها به ۵ دسته کلی ذیل تقسیم بندی می شوند:

- روئیتگر لیونبرگر (Luenberger Observer)
- روئیتگر مود لغزشی (Sliding Mode Observer)
- فیلتر کالمن توسعه یافته (Extended Kalman Filter)
- سیستمهای تطبیقی مدل مرجع (Adaptive Model Reference Systems (MRAS)
- روشهای هوشمند (سیستمهای فازی، شبکه های عصبی، ...)

✓ در ادامه پس از معرفی روئیتگر خطی لیونبرگر، یک روئیتگر لغزشی برای تخمین موقعیت موتور PMSM ارائه می شود.

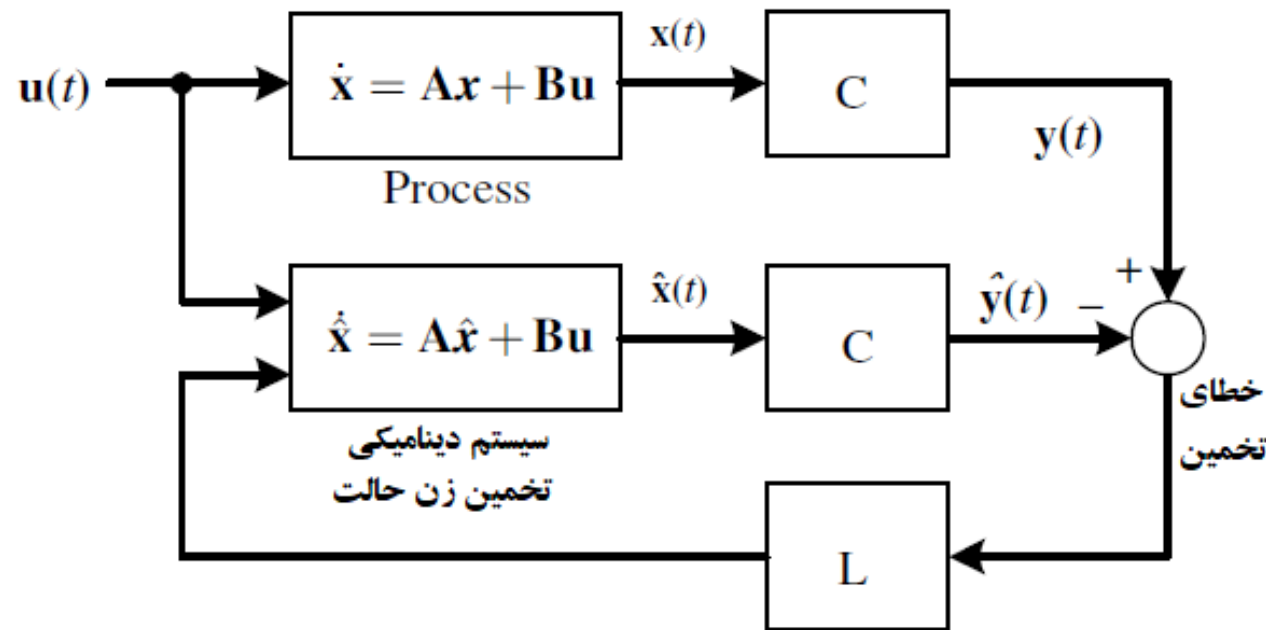


- ✓ سیستم دینامیکی خطی زیر را در نظر بگیرید که با معادله فضای حالت  $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$  قابل بیان است.
- ✓ چون سیستم را خطی و غیرمتغیر به زمان فرض کرده ایم، ماتریس ضرایب  $A$  و  $B$  ماتریسهای با درایه های ثابت هستند.
- ✓  $x(t)$  بردار متغیرهای حالت سیستم هست که اگر مرتبه سیستم  $n$  باشد یعنی تعداد  $n$  متغیر حالت در بردار  $x(t)$  داریم.
- ✓  $u(t)$  ورودی های سیستم هستند که فرض کنید تعدادشان  $m$  عدد است.
- ✓  $y(t)$  خروجی های قابل اندازه گیری سیستم هستند که با متغیرهای حالت رابطه  $y(t) = Cx(t)$  دارند و فرض کنید تعدادشان  $l$  باشد.
- ✓ در اغلب موارد تعداد خروجی های سیستم یعنی  $y(t)$  از تعداد متغیرهای حالت یعنی  $n$  کمتر است.
- ✓ لذا با اندازه گیری خروجی های  $y$  نمی توان  $n$  متغیر حالت را به دست آورد چون ماتریس  $C$  مربعی نیست و مرتبه اش حداکثر  $l$  است در صورتیکه برای تعیین  $n$  متغیر حالت  $x(t)$  باید مرتبه  $C$  برابر  $n$  باشد.



- ✓ برای تعیین مقادیر متغیرهای حالت  $x(t)$  می توان از یک سیستم دینامیکی بنام رویتگر استفاده کرد که با استفاده از مقادیر  $u$  و  $y$  می تواند  $x(t)$  را تخمین بزند. این سیستم توسط آقای لیونبرگر پیشنهاد شد که به رویتگر لیونبرگر مشهور است.

✓ ساختار رویتگر لیونبرگر بصورت شکل زیر است که در آن از معادلات فضای حالت خود سیستم و تنها از ورودی  $u$  و خروجی  $y$  سیستم برای تخمین متغیرهای حالت  $\hat{x}$  استفاده می شود.



✓ خطای تخمین  $y - \hat{y}$  در ماتریس بهره  $L$  ضرب شده و بعنوان پسخور (فیدبک) به سیستم تخمین زن اعمال می شود تا خطای تخمین به سمت صفر برود.

✓ با صفر شدن خطای تخمین، متغیرهای حالت تخمین زده شده  $\hat{x}$  برابر با متغیرهای حالت واقعی سیستم یعنی  $x$  خواهند شد.



$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu \quad (18)$$

✓ اگر معادله دینامیکی تخمین زن را بصورت زیر در نظر بگیریم:

$$\tilde{x} = x - \hat{x} \quad (19)$$

✓ و خطای تخمین را هم به صورت زیر در نظر بگیریم:

✓ با اعمال فیدبک خطای تخمین یعنی  $L(y - \hat{y})$  به تخمین زن، خواهیم داشت:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}) \quad (20)$$

$$\dot{\tilde{x}} = (A - LC)\tilde{x} \quad (21)$$

✓ لذا خطای تخمین دارای معادله دینامیکی زیر خواهد بود:

✓ برای اینکه خطای تخمین به سمت صفر برود باید ریشه های معادله مشخصه معادله دینامیکی فوق در سمت چپ محور موهومی  $j\omega$  قرار بگیرند.

✓ برای این منظور ماتریس بهره  $L$  باید به نحوی تعیین گردد که ریشه های معادله مشخصه زیر همگی در سمت چپ محور  $j\omega$  قرار گیرند:

$$\det[sI - (A - LC)] = 0 \quad (22)$$

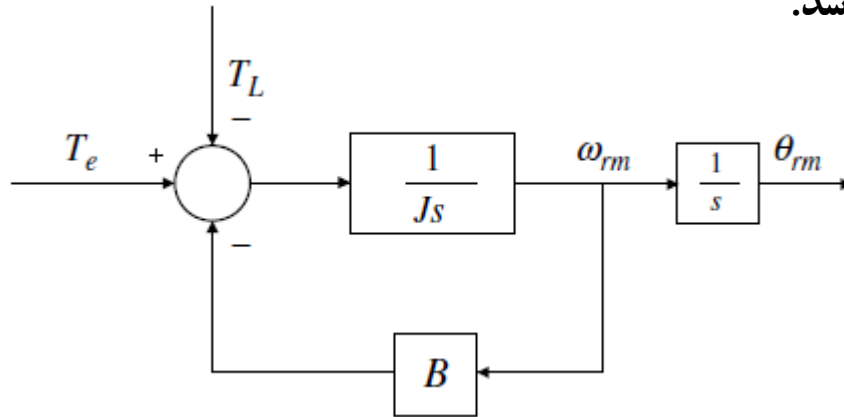
✓ به فرض اگر  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$  بخواهیم  $n$  ریشه معادله مشخصه فوق باشند، معادله مشخصه مطلوب سیستم روئیتگر برابر است با:

$$\alpha_e(s) = (s - \beta_1)(s - \beta_2)(s - \beta_n) \quad (23)$$

✓ حال درایه های ماتریس بهره  $L$  را طوری تعیین می کنیم تا ریشه های معادله مشخصه روئیتگر (22) برابر معادله (23) باشد.

✓ فرض کنید معادله دینامیکی سرعت محور یک موتور الکتریکی بصورت زیر باشد:  $T_e = J \frac{d\omega_{rm}}{dt} + B\omega_{rm} + T_L$  (۲۴)

✓ که بصورت شکل زیر قابل نمایش می باشد.  $T_e$  ورودی سیستم می باشد.



✓ هدف آن است که با داشتن خروجی موقعیت  $\theta_{rm}$

بتوانیم سرعت  $\omega_{rm}$  را با رویتگر لیونبرگر، تخمین بزنیم.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ T_L \end{bmatrix}$$

(۲۵)

✓ برای این منظور بردار متغیر حالت سیستم را بصورت زیر تعریف می کنیم:

✓ خروجی سیستم یعنی  $y$  را فرض کنید  $\theta_{rm}$  باشد. معادلات فضای حالت سیستم بصورت زیر خواهد بود:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta_{rm} \\ \omega_{rm} \\ T_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{rm} \\ \omega_{rm} \\ T_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} T_e \quad (۲۶)$$

✓ متغیر حالت سوم یعنی  $T_L$  را فرض کرده ایم ثابت باشد و لذا مشتق آن در معادله فوق بصورت صفر منظور شده است.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta_{rm} \\ \omega_{rm} \\ T_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{rm} \\ \omega_{rm} \\ T_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} T_e \quad (27)$$

✓ معادله دینامیکی رویتگر بر مبنای معادله (۲۰)، برای این سیستم بصورت زیر خواهد بود:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_{rm} \\ \hat{\omega}_{rm} \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{\hat{B}}{\hat{J}} & -\frac{1}{\hat{J}} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_{rm} \\ \hat{\omega}_{rm} \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} T_e + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix} \left( \theta_{rm} - [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \hat{\theta}_{rm} \\ \hat{\omega}_{rm} \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} \right) \quad (28)$$

✓ با تعیین مقادیر مناسب برای درایه های ماتریس فیدبک L یعنی مقادیر  $l_1, l_2, l_3$  می توان خطاهای تخمین را صفر نمود.

✓ معادله مشخصه سیستم دینامیکی رویتگر (۲۸) بصورت زیر بر حسب درایه های ماتریس فیدبک L قابل نوشتن است:

$$\det [s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C})] = s^3 + \frac{l_1 J + B}{J} s^2 + \frac{l_2 J + l_1 B}{J} s - \frac{l_3}{J} = 0 \quad (29)$$





$$\det [s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{LC})] = s^3 + \frac{l_1 J + B}{J} s^2 + \frac{l_2 J + l_1 B}{J} s - \frac{l_3}{J} = 0 \quad (30)$$

✓ اگر  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  سه ریشه مطلوب معادله مشخصه فوق باشند، معادله مشخصه مطلوب سیستم رویتگر برابر است با:

$$\begin{aligned} \alpha_e(s) &= (s - \beta_1)(s - \beta_2)(s - \beta_3) \\ &= s^3 - (\beta_1 + \beta_2 + \beta_3)s^2 + (\beta_1\beta_2 + \beta_2\beta_3 + \beta_3\beta_1)s - \beta_1\beta_2\beta_3 = 0 \end{aligned} \quad (31)$$

✓ با برابر قرار دادن دو معادله (30) و (31)، درایه های ماتریس  $\mathbf{L}$  بصورت زیر بدست می آیند:

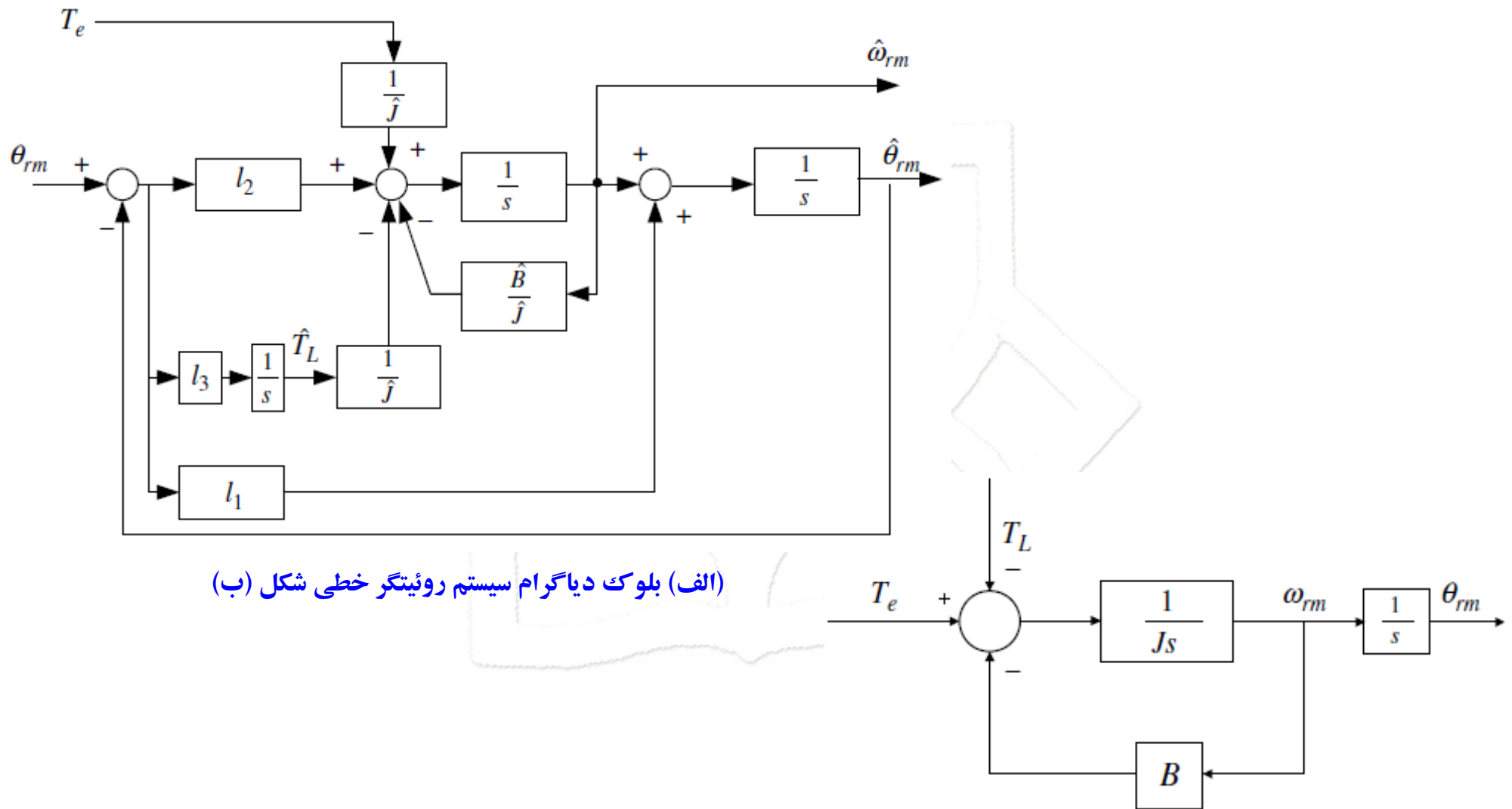
$$l_1 = -(\beta_1 + \beta_2 + \beta_3) - \frac{B}{J} \quad (32)$$

$$l_2 = (\beta_1\beta_2 + \beta_2\beta_3 + \beta_3\beta_1) - \frac{B}{J} l_1$$

$$= (\beta_1\beta_2 + \beta_2\beta_3 + \beta_3\beta_1) + (\beta_1 + \beta_2 + \beta_3) \frac{B}{J} + \left(\frac{B}{J}\right)^2 \quad (33)$$

$$l_3 = \beta_1\beta_2\beta_3 J \quad (34)$$

همچنین، بلوک دیاگرام سیستم رویتگر بصورت زیر قابل نمایش است:



✓ طراحی رویتگر لیونبرگر برای موتور PMSM همانند روشی است که در بخشهای قبل اشاره گردید.

✓ معادلات دینامیکی موتور PMSM در دستگاه دوماحوری ساکن  $\alpha\beta$  بصورت زیر است:

$$\begin{cases} u_\alpha = Ri_\alpha + \frac{Ldi_\alpha}{dt} - \omega\psi_f \sin(\theta_e) \\ u_\beta = Ri_\beta + \frac{Ldi_\beta}{dt} + \omega\psi_f \cos(\theta_e) \\ T_e = \frac{3}{2}n(\psi_f i_\beta \cos(\theta_e) - \psi_f i_\alpha \sin(\theta_e)) \end{cases} \quad (35)$$

$$\begin{cases} \lambda_\alpha = \psi_f \cos(\theta_e) \\ \lambda_\beta = \psi_f \sin(\theta_e) \end{cases} \quad (36)$$

$$\begin{cases} \frac{d\lambda_\alpha}{dt} = -\omega\lambda_\beta \\ \frac{d\lambda_\beta}{dt} = \omega\lambda_\alpha \end{cases} \quad (37)$$

✓ با تعریف  $\lambda_\alpha$  و  $\lambda_\beta$  بصورت (۳۳) خواهیم داشت:

✓ معادلات فوق را با تعریف متغیرهای فضای حالت و ورودیها و خروجیهای زیر، به فرم فضای حالت در می آوریم:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (38)$$

$$x = \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ \lambda_\alpha \\ \lambda_\beta \end{pmatrix}, u = \begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix}, y = \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \quad (39)$$

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (38) \quad x = \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ \lambda_\alpha \\ \lambda_\beta \end{pmatrix}, u = \begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix}, y = \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \quad (39)$$

✓ ضرایب ماتریسهای فضای حالت عبارتند از:

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 & \frac{3}{L} \\ 0 & -\frac{R}{L} & -\frac{3}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\omega \\ 0 & 0 & \omega & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (40)$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\left\{ -\frac{R}{L}, -\frac{R}{L}, j\omega, -j\omega \right\} \quad (41)$$

✓ ریشه های معادله مشخصه سیستم فوق عبارتند از:

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + Bu + G(y - C\hat{x}) \quad (42)$$

✓ همانند قبل، رویتگر خطی باغ ماتریس بهره فیدبک G طراحی می شود و معادله مشخصه رویتگر بصورت زیر بدست می آید:

✓ ماتریس بهره فیدبک روئیتگر با توجه به داشتن ۴ متغیر حالت و ۲ خروجی، یک ماتریس ۴ در ۲ بصورت زیر است:

$$G = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \\ G_{31} & G_{32} \\ G_{41} & G_{42} \end{pmatrix} \quad (۴۳)$$

$$e = x - \hat{x} \quad (۴۴)$$

✓ با تعریف خطای تخمین بصورت (۴۴)، معادله دینامیکی خطای تخمین در فرم فضای حالت بصورت زیر خواهد شد:

$$\frac{de}{dt} = A(x - \hat{x}) - G(y - C\hat{x}) = (A - GC)e \quad (۴۵)$$

✓ برای آنکه خطای تخمین به سمت صفر برود، ریشه های معادله مشخصه ماتریس A-GC باید پایدار باشند (یعنی سمت چپ محور موهومی).

✓ با انجام محاسبات، ماتریس بهره می تواند بصورت زیر تعیین گردد:

$$\begin{cases} G_{11} = G_{22} = \frac{(k-1)R}{L} \\ G_{21} = -G_{12} = (1-k)\omega \\ G_{31} = G_{42} = (k^2 - k)R \\ G_{32} = -G_{41} = (1-k)L\omega \end{cases} \quad \begin{matrix} G_{11} = G_{22}, \\ G_{21} = -G_{12} \\ G_{31} = G_{42}, \\ G_{32} = -G_{41}. \end{matrix} \quad k > 1 \quad (۴۶)$$

$$\begin{cases} G_{11} = G_{22} = \frac{(k-1)R}{L} \\ G_{21} = -G_{12} = (1-k)\omega \\ G_{31} = G_{42} = (k^2 - k)R \\ G_{32} = -G_{41} = (1-k)L\omega \end{cases} \quad \begin{cases} G_{11} = G_{22}, \\ G_{21} = -G_{12} \\ G_{31} = G_{42}, \\ G_{32} = -G_{41}. \end{cases} \quad k > 1 \quad (46)$$

✓ مساله ای که با ماتریس بهره فوق وجود دارد آنست برخی ضرایب به سرعت موتور وابسته هستند که متغیر بودن آن، کار طراحی و پیاده سازی را دشوار می کند.

✓ برای حل این مشکل، می توان بجای سرعت  $\omega$  از عدد مثبت  $M$  استفاده نمود که در نتیجه داریم:

$$\begin{cases} G_{11} = G_{22} = \frac{(k-1)R}{L} \\ G_{21} = -G_{12} = (1-k)M \\ G_{31} = G_{42} = (k^2 - k)R \\ G_{32} = -G_{41} = (1-k)LM \end{cases} \quad (47)$$

✓ در نتیجه ماتریس معادله مشخصه روئیتگر عبارتست از:

$$A - GC = \begin{pmatrix} -\frac{kR}{L} & (1-k)M & 0 & \frac{\omega}{L} \\ (k-1)M & -\frac{kR}{L} & -\frac{\omega}{L} & 0 \\ (k-k^2)R & (k-1)LM & 0 & -\omega \\ (1-k)LM & (k-k^2)R & \omega & 0 \end{pmatrix} \quad (48)$$

$$x = \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ \lambda_\alpha \\ \lambda_\beta \end{pmatrix} \quad (49)$$

✓ رویتگر لیونبرگر، توانست متغیرهای حالت زیر را تخمین بزند:

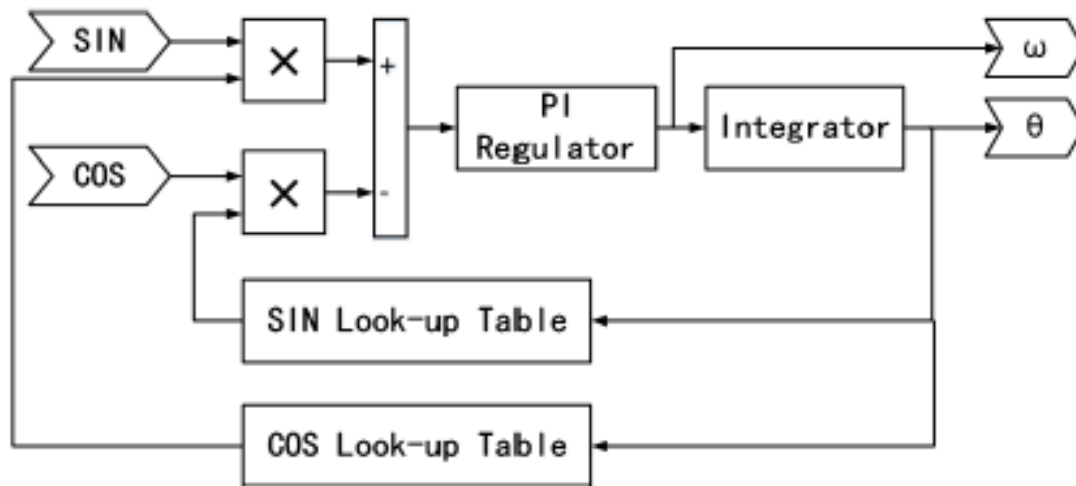
✓ حال باید موقعیت  $\theta_e$  و سرعت  $\omega$  روتور را از روی این متغیرهای حالت بدست آورد.

✓ برای محاسبه  $\theta_e$ ، با استفاده از دو متغیر تخمین زده شده  $x_3$  و  $x_4$  یعنی  $\lambda_\alpha$  و  $\lambda_\beta$  استفاده می کنیم:

$$\begin{cases} \lambda_\alpha = \psi_f \cos(\theta_e) \\ \lambda_\beta = \psi_f \sin(\theta_e) \end{cases} \quad (50)$$

✓ با مشتق گیری از  $\theta_e$  سرعت  $\omega$  قابل محاسبه است.

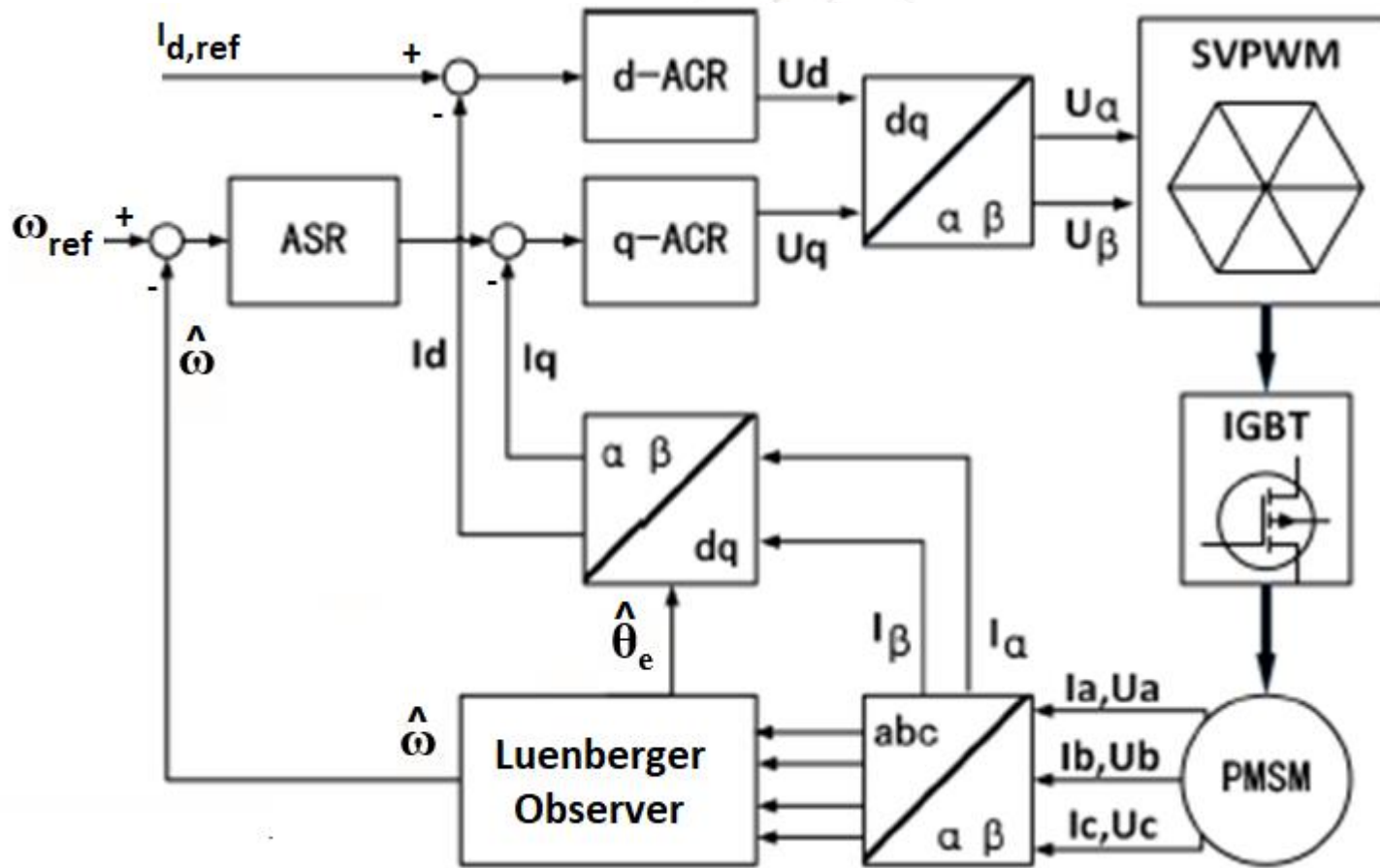
✓ استفاده از مشتق گیری و رابطه (47) شاید دقت مناسبی نداشته باشد. راه حل بهتر آنست که از PLL استفاده شود.



استفاده از PLL برای محاسبه سرعت و موقعیت روتور با استفاده از

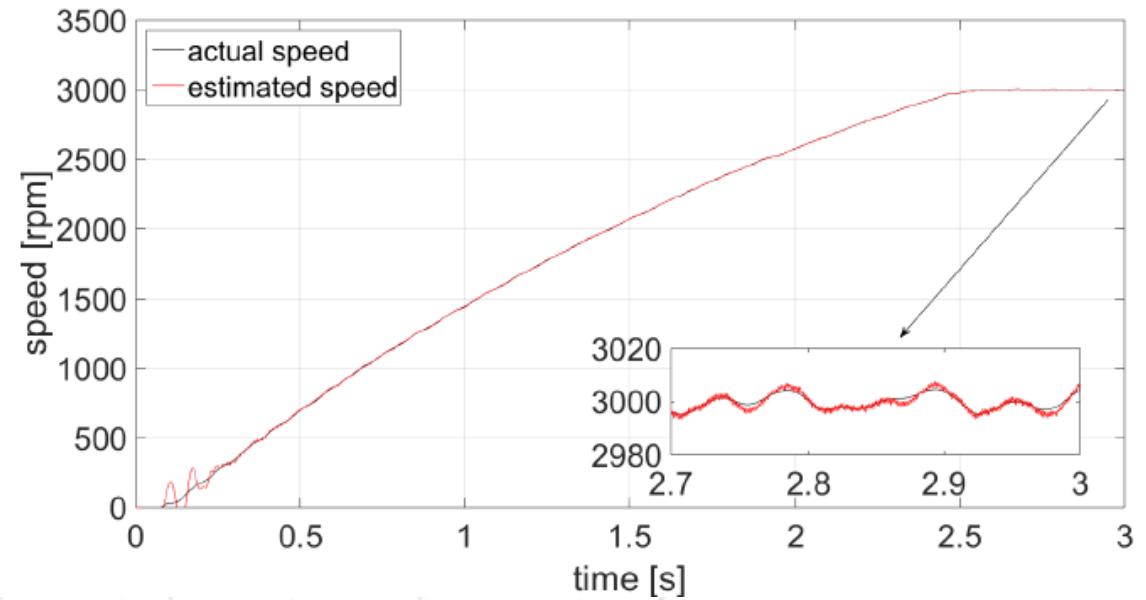
دو متغیر حالت تخمین زده شده  $\lambda_\alpha$  و  $\lambda_\beta$

✓ سیستم کنترل برداری موتور PMSM با استفاده از مقادیر موقعیت و سرعت روتور تخمینی توسط روئینگر لیونبرگر بصورت زیر است:

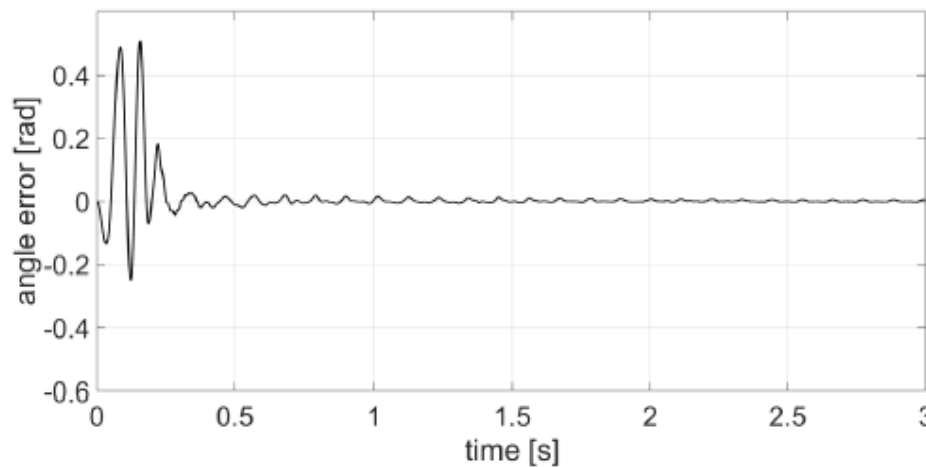


کنترل برداری سنسورلس با روئینگر لیونبرگر



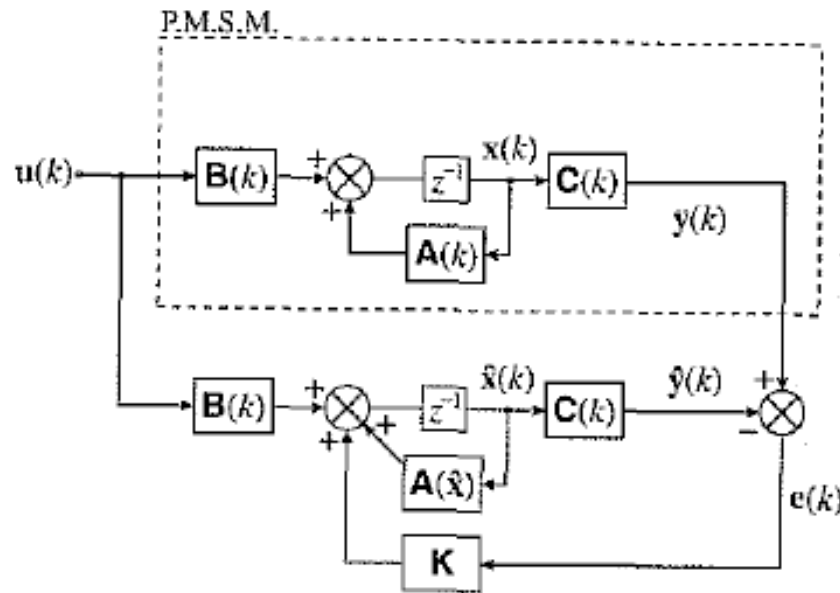


(الف) سرعت روتور واقعی و تخمین زده شده توسط رویتگر لیونبرگر



(ب) خطای موقعیت روتور تخمین زده شده توسط رویتگر لیونبرگر

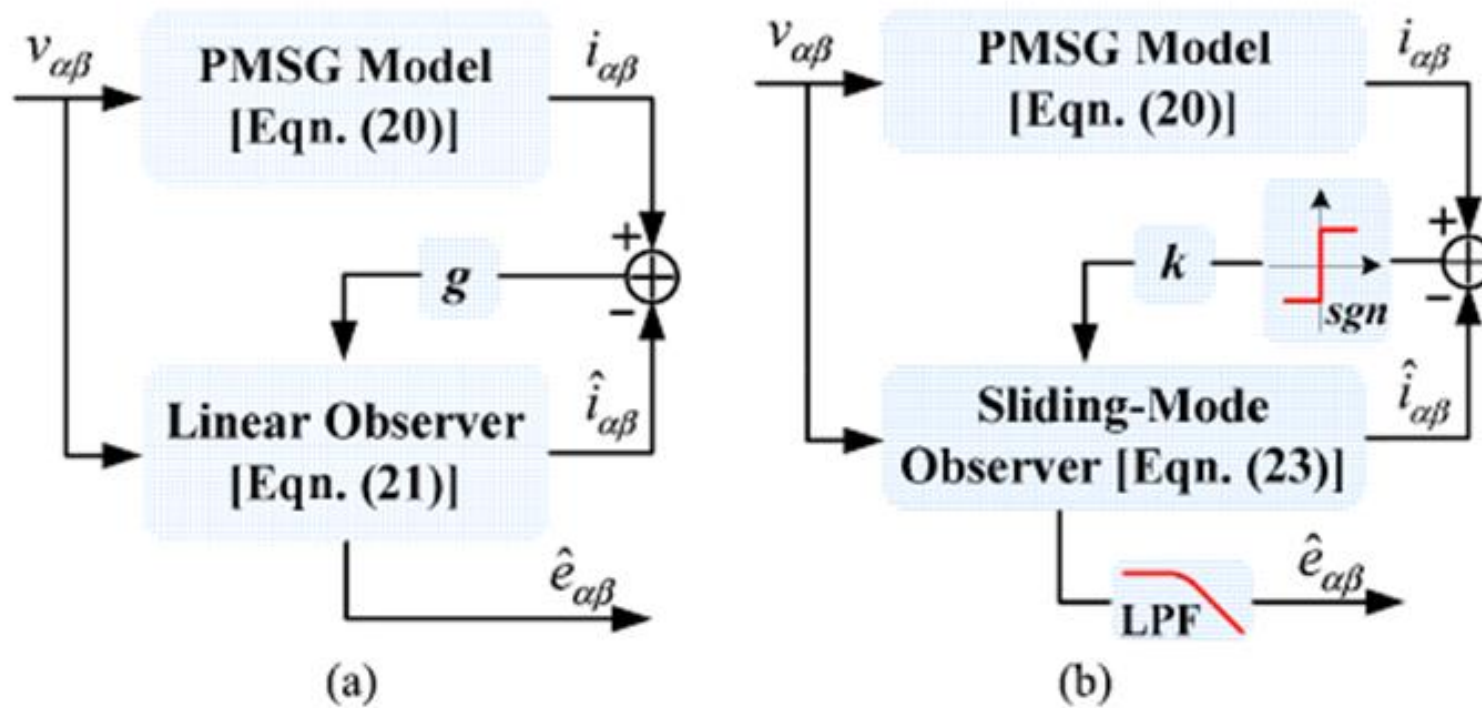
- ✓ همانطور که مشاهده شد در روئیتگر لیونبرگر، خطای تخمین بصورت تابعی خطی به دینامیک روئیتگر اضافه شد.
- ✓ روئیتگر لیونبرگر دارای دو مشکل است: ۱- در صورت تغییر پارامترهای ماتریس ضرایب معادلات حالت، تخمین به درستی انجام نمی شود. ۲- وجود نیز در اندازه گیری خروجی  $y$  سبب ایجاد خطای تخمین می شود.
- ✓ برای رفع مشکل اول، می توان از روئیتگر لیونبرگر تطبیقی استفاده نمود و برای رفع مشکل دوم از فیلتر کالمن.
- ✓ روئیتگر دیگری که تقریباً دو مشکل فوق را همزمان حل می کند، روئیتگر مود لغزشی یا **Sliding mode observer** است که در ادامه از آن برای تخمین سرعت و موقعیت موتور PMSM استفاده می شود.



$$\frac{d\hat{x}}{dt} = A(\hat{x})\hat{x} + Bu + Ke$$

روئیتگر لیونبرگر

- ✓ در رویتگر مود لغزشی، بجای اضافه نمودن ترم یا فیدبک خطی از خطای تخمین به رویتگر اضافه می شود.
- ✓ ویژگی رویتگر مود لغزشی، مقاوم بودن نسبت به تغییرات پارامترها و نامعینی های مدل سیستم است و در بسیاری از کاربردها پاسخ خوبی داشته است.



مقایسه رویتگر خطی (مانند لیونبرگر) با رویتگر مود لغزشی در تخمین موقعیت روتور ماشین سنکرون



- ✓ در این بخش از یک روئیتگر جریان مود لغزشی برای تخمین سرعت و موقعیت روتور استفاده می شود.
- ✓ به فرض معادلات موتور PMSM در دستگاه دوجوری ساکن  $\alpha\beta$  بصورت زیر باشند:

$$\begin{cases} L_s \left( \frac{di_\alpha}{dt} \right) = -R_s i_\alpha - e_\alpha + u_\alpha \\ L_s \left( \frac{di_\beta}{dt} \right) = -R_s i_\beta - e_\beta + u_\beta \end{cases} \quad (51)$$

$$\begin{cases} e_\alpha = -\psi_f \omega_r \sin \theta \\ e_\beta = \psi_f \omega_r \cos \theta \end{cases} \quad (52)$$

- ✓ بر طبق تئوری مود لغزشی، سطح لغزش بصورت خطای بردار جریان و بصورت زیر تعریف می شود:

$$S(X) = \hat{i}_s - i_s = 0 \quad (53)$$

- ✓ که در آن بردار حالت روئیتگر را مولفه های  $\alpha\beta$  جریان استاتور و بصورت تشکیل می دهند:

$$\hat{i}_s = [\hat{i}_\alpha \ \hat{i}_\beta]^T \quad (54)$$

- ✓ در نتیجه، روئیتگر مود لغزشی با اضافه کردن توابع غیرخطی علامت (sgn) از سطح لغزش به معادلات روئیتگر، بصورت زیر بدست می آید:

$$\begin{cases} L_s \left( \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} \right) = -R_s \hat{i}_\alpha + u_\alpha - k \operatorname{sgn}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ L_s \left( \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} \right) = -R_s \hat{i}_\beta + u_\beta - k \operatorname{sgn}(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{cases} \quad (55)$$

- ✓ با توجه به مشکلات چترینگ استفاده از تابع sgn بجای آن از توابع مناسب تر استفاده می شود.



✓ یکی از توابع مناسبی که می تواند جایگزین تابع علامت sgn بشود، تابع سیگموئید بوده که بصورت زیر است:

$$F(x) = \left[ \frac{2}{(1 + e^{-ax})} \right] - 1 \quad (56)$$

✓ با استفاده از تابع سیگموئید، معادلات دینامیکی روئیتگر SMO می تواند بصورت زیر بازنویسی بشود:

$$\begin{cases} L_s \left( \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} \right) = -R_s \hat{i}_\alpha + u_\alpha - kF(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ L_s \left( \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} \right) = -R_s \hat{i}_\beta + u_\beta - kF(\hat{i}_\beta - i_\beta). \end{cases} \quad (57)$$

✓ برای اثبات پایداری SMO و تعیین شروط پایداری آن، تابع لیاپانوف  $V(x)$  را بصورت زیر در نظر می گیریم:

$$V = \frac{1}{2} S(X)^T S(X). \quad (58)$$

✓ طبق قضیه پایداری لیاپانوف، برای پایدار ماندن روئیتگر و صفر شدن خطای تخمین، شرط زیر باید برآورده بشود:

$$\dot{V} = S(X)^T \dot{S}(X) \leq 0. \quad (59)$$

✓ برای اثبات رابطه فوق،  $S(X)$  و مشتق آن را محاسبه می کنیم.



✓ با استفاده از معادلات (۵۱) تا (۵۵) داریم:

$$\begin{cases} L_s \left[ \frac{dS_\alpha(X)}{dt} \right] = -R_s S_\alpha(X) + e_\alpha - kF(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ L_s \left[ \frac{dS_\beta(X)}{dt} \right] = -R_s S_\beta(X) + e_\beta - kF(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{cases} \quad (60)$$

$$S(X) = \begin{bmatrix} S_\alpha(X) \\ S_\beta(X) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha - i_\alpha \\ \hat{i}_\beta - i_\beta \end{bmatrix} \quad (61)$$

✓ که در آن:

✓ با انجام کمی محاسبه داریم:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S(X)^T \dot{S}(X) = S_\alpha \dot{S}_\alpha + S_\beta \dot{S}_\beta \\ &= \frac{1}{L_s} \left[ (\hat{i}_\alpha - i_\alpha) e_\alpha - k(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) F(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \right] \\ &\quad + \frac{1}{L_s} \left[ (\hat{i}_\beta - i_\beta) e_\beta - k(\hat{i}_\beta - i_\beta) F(\hat{i}_\beta - i_\beta) \right] \\ &\quad - \frac{R_s}{L_s} \left[ (\hat{i}_\alpha - i_\alpha)^2 + (\hat{i}_\beta - i_\beta)^2 \right] \leq 0. \end{aligned} \quad (62)$$

✓ برای منقی شدن مشتق تابع لیاپانوف V، باید شرط زیر برقرار باشد:

$$k > \max(|e_\alpha|, |e_\beta|) \quad (63)$$

✓ با صفر شدن خطای تخمین، با مقایسه دو معادله (۵۱) و (۵۰) زیر

$$\begin{cases} L_s \left( \frac{di_\alpha}{dt} \right) = -R_s i_\alpha - e_\alpha + u_\alpha \\ L_s \left( \frac{di_\beta}{dt} \right) = -R_s i_\beta - e_\beta + u_\beta \end{cases} \quad (51)$$

$$\begin{cases} L_s \left( \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} \right) = -R_s \hat{i}_\alpha + u_\alpha - k \operatorname{sgn}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ L_s \left( \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} \right) = -R_s \hat{i}_\beta + u_\beta - k \operatorname{sgn}(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{cases} \quad (50)$$

✓ ولتاژهای ضدمحر که تخمین شده شده موتور در دستگاه دوماحوری ساکن  $\alpha\beta$  بصورت زیر قابل استخراج خواهند بود:

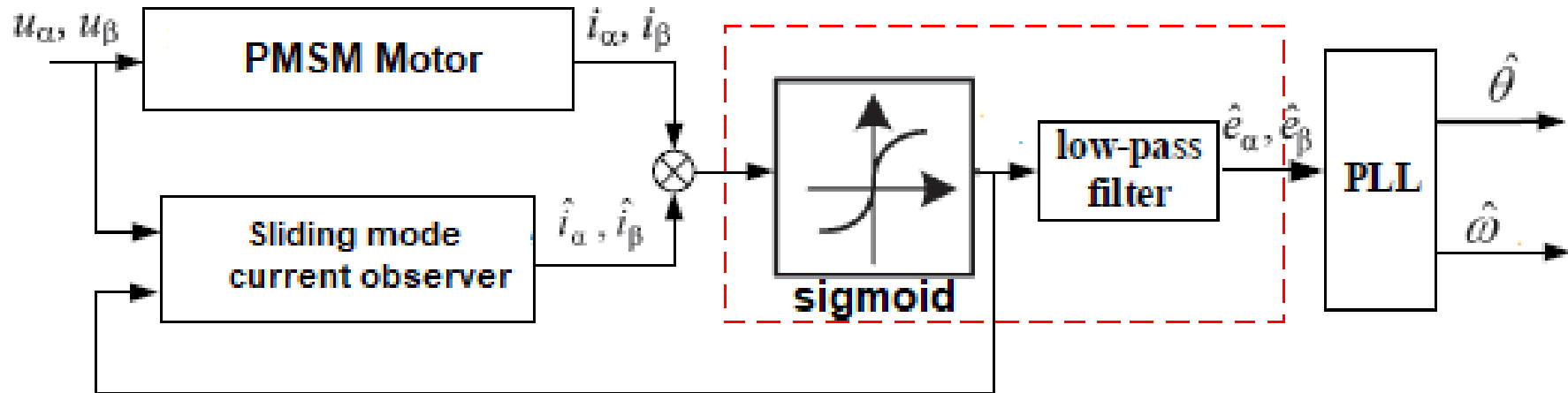
$$\begin{cases} \hat{e}_\alpha = kF(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ \hat{e}_\beta = kF(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{cases} \quad (64) \quad \begin{cases} e_\alpha = -\psi_f \omega_r \sin \theta \\ e_\beta = \psi_f \omega_r \cos \theta \end{cases} \quad (52)$$

✓ با توجه به رابطه ولتاژهای ضدمحر که و توابع مثلثاتی زاویه روتور  $\theta$  (رابطه ۵۲)، می توانیم از رابطه (۶۴)، موقعیت روتور را بصورت زیر تخمین بزنیم:

$$\hat{\theta} = -\arctan \left( \frac{\hat{e}_\alpha}{\hat{e}_\beta} \right) \quad (65)$$

$$\hat{\theta} = -\arctan\left(\frac{\hat{e}_\alpha}{\hat{e}_\beta}\right) \quad (75)$$

✓ برای محاسبه سرعت می توان از زاویه  $\theta$  مشتق گرفت. اما بهتر است که همانند قبل از PLL بصورت زیر استفاده بشود:



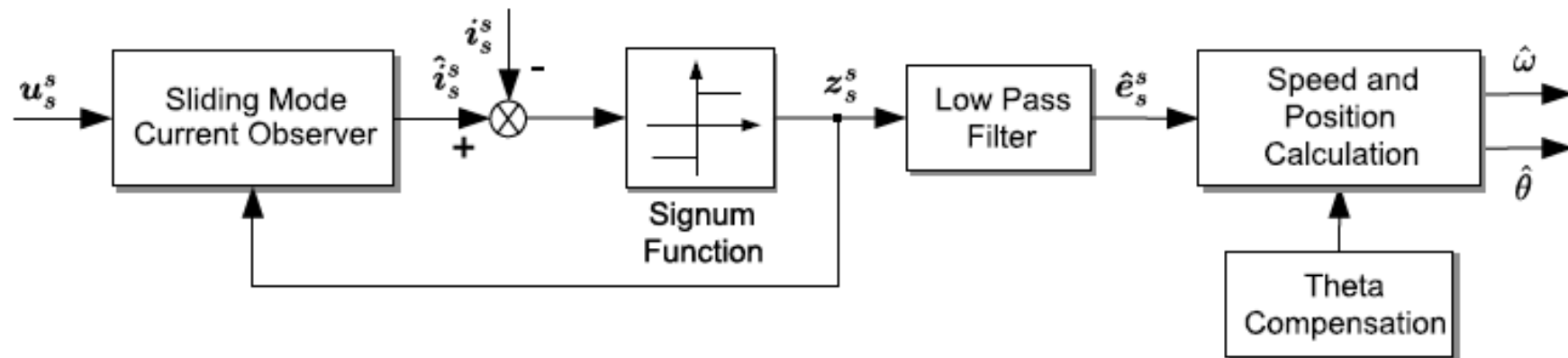
استفاده از PLL در کنار رویتگر جریان مود لغزشی برای استخراج  $\theta$  و  $\omega$  روتور از ولتاژهای ضدمحر که  $e_\alpha$  و  $e_\beta$  تخمینی

✓ توجه شود که با توجه به وجود نویز و برای افزایش دقت تخمین از یک فیلتر پایین گذر، قبل از PLL استفاده شده است که این فیلتر می تواند سبب ایجاد تاخیر بشود.



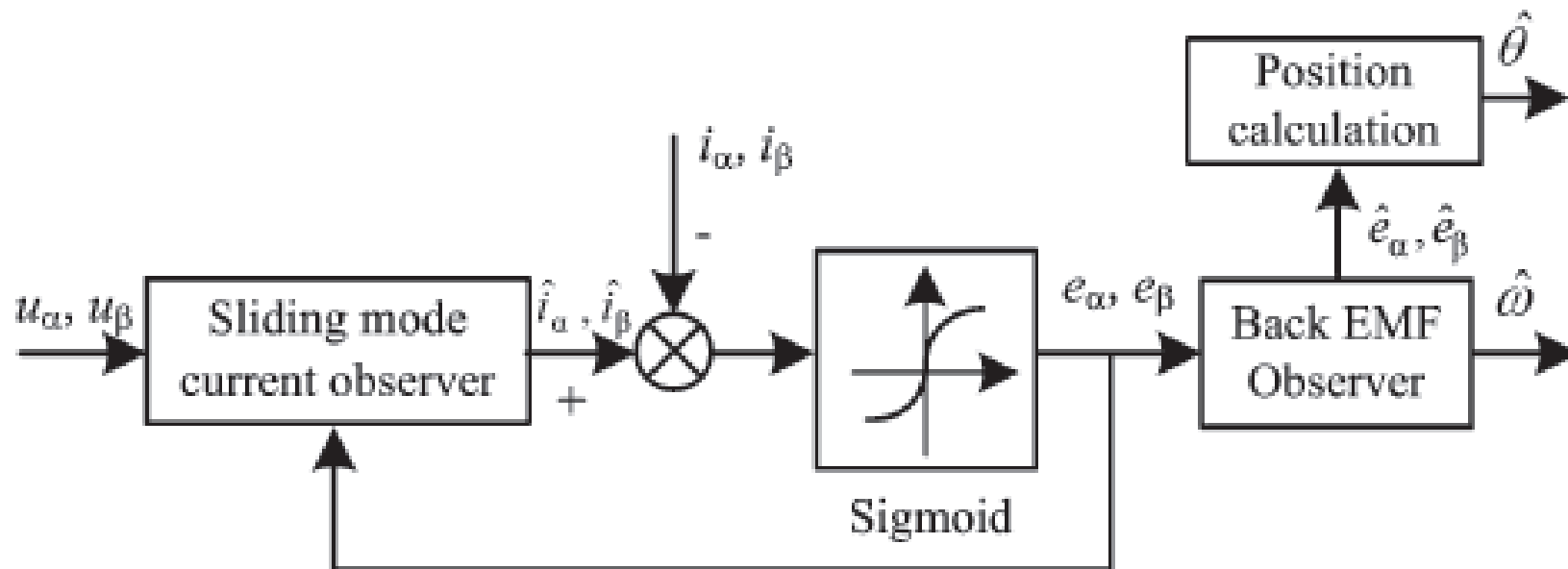
- ✓ رویتگر سرعتی که در این بخش ارائه شد، تنها یکی از انواع مختلف رویتگری است که در مقالات پیشنهاد شده است.
- ✓ در مراجع، روشهای مختلفی برای بهبود عملکرد رویتگر SMO پایه ای ارائه شده در این بخش ارائه شده اند.
- ✓ برای نمونه، وجود فیلتر پائین گذر نویزگیر در اسلاید ۵۶ سبب تاخیر در فاز ولتاژهای ضدمحر که تخمینی می شود.

✓ برای رفع این مشکل، در برخی مراجع، تاخیر فاز ناشی از فیلترها را در مرحله آخر مطابق شکل زیر، جبران سازی نموده است.



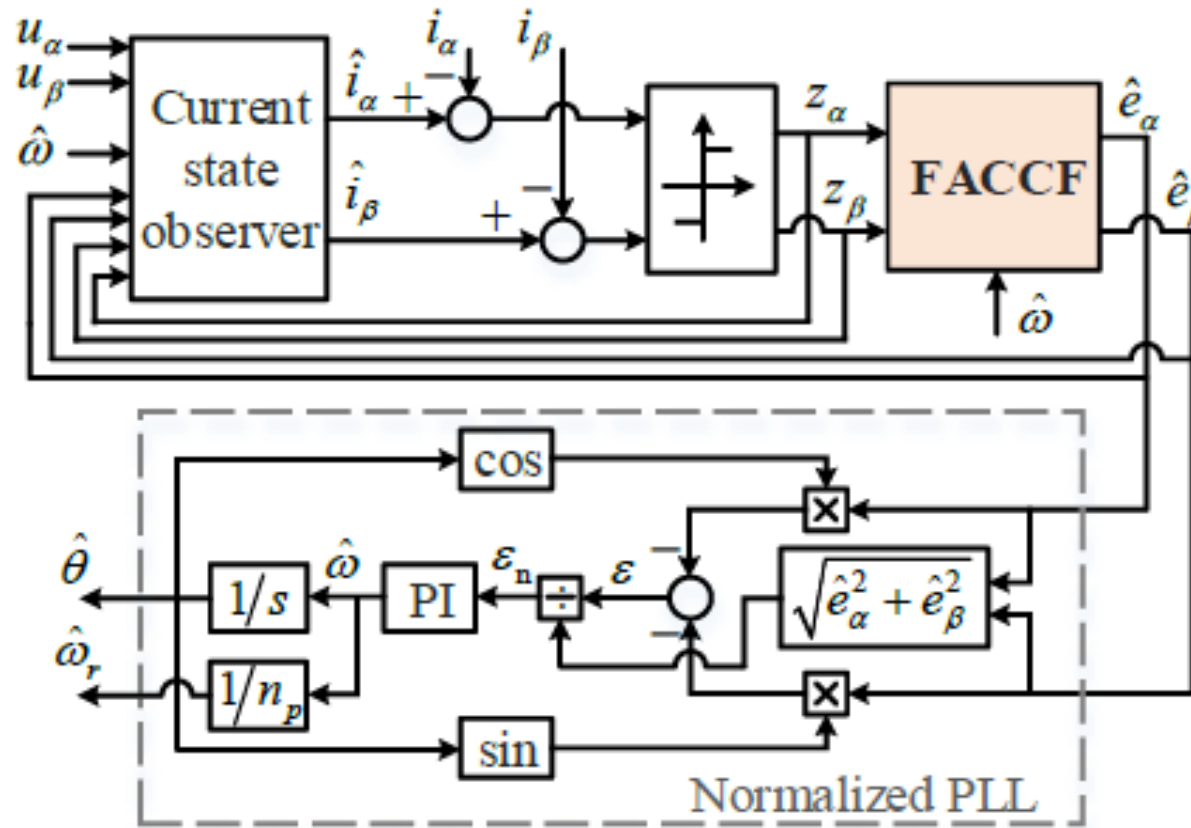
جبران سازی تاخیر فاز ناشی از فیلترینگ قبل از PLL هنگام بکارگیری رویتگر مد لغزشی تخمین جریانهای موتور PMSM

✓ برای رفع مشکل تاخیر فازی از فیلترها، در مرجعی دیگر، طراحی یک رویتگر بنام رویتگر ولتاژ ضدمحر که بر مبنای ولتاژهای ضدمحر که تخمینی در معادله (۶۱)، پیشنهاد شده است که ساختار آن به صورت شکل زیر است:



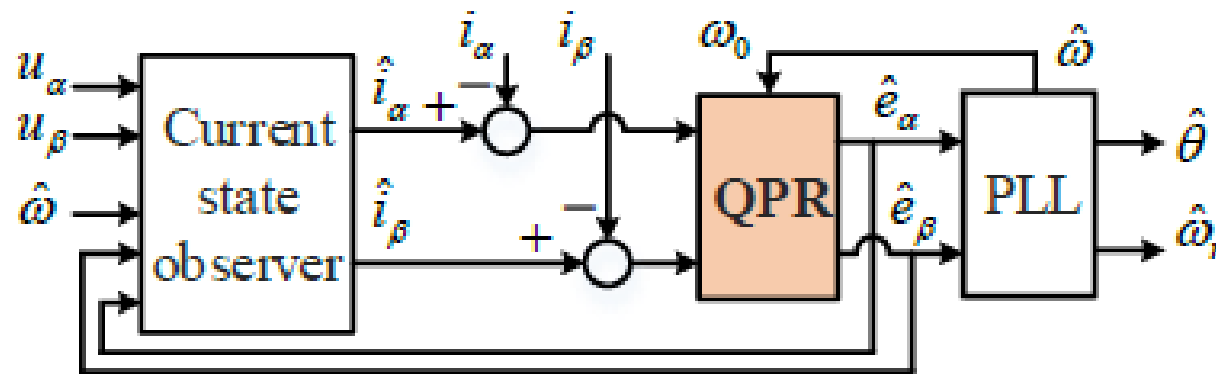
طراحی رویتگر تخمین ولتاژ ضدمحر که در کنار رویتگر مود لغزشی تخمین جریانهای موتور PMSM

✓ در یک مرجع دیگر از یک فیلتر تطبیقی با ضرایب مختلط موسوم به (FACCF) در کنار روئیتگر جریان مود لغزشی بصورت زیر استفاده کرده است.



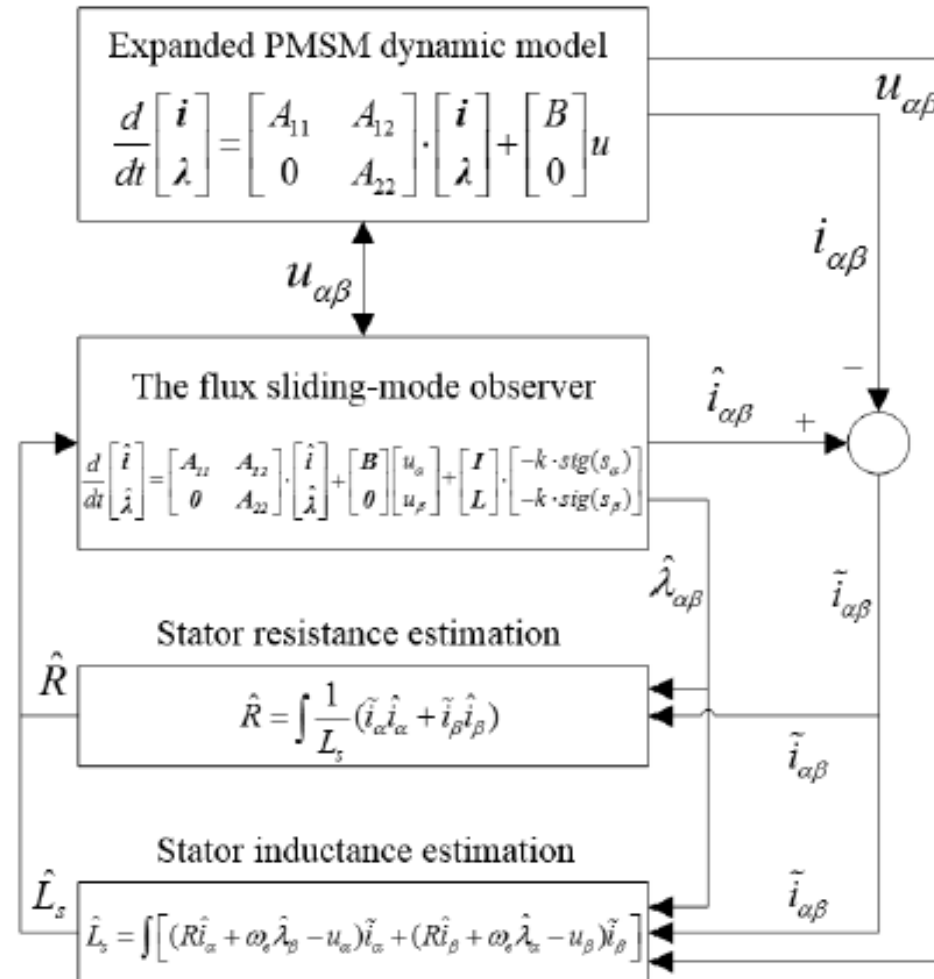
طراحی روئیتگر تخمین ولتاژ ضد محرکه FACCF در کنار روئیتگر مود لغزشی تخمین جریانهای موتور PMSM

✓ در یک مرجع دیگر از یک کنترل کننده های شبه تناسبی - رزونانسی (QPR) در کنار رویتگر جریان مود لغزشی بصورت زیر استفاده کرده است.



طراحی رویتگر تخمین ولتاژ ضدمحر که QPR در کنار رویتگر مود لغزشی تخمین جریانهای موتور PMSM

✓ در برخی مراجع همزمان با تخمین جریانها بوسیله رویتگر مد لغزشی پارامترهای موتور مانند مقاومت و اندوکتانس استاتور هم تخمین زده می شود.



تخمین مقادیر مقاومت و اندوکتانس استاتور همزمان با تخمین جریان توسط رویتگر جریان مد لغزشی موتور PMSM