



مبحث اول:

مقدمه‌ای بر محرکه‌های الکتریکی

- ☐ مقدمه
- ☐ مبدل‌ها و عناصر الکترونیک قدرت
- ☐ عملکرد چند ربعی محرکه
- ☐ دینامیک سیستم موتور – بار و انواع بارها
- ☐ انواع درایوهای الکتریکی
- ☐ حسگرها (سنسورها) در درایوهای الکتریکی و کنترل‌کننده‌ها





➤ **محرکه الکتریکی (یا درایو الکتریکی):** به یک سیستم کنترل مبتنی بر مبدل‌های نیمه‌هادی (الکترونیک قدرت) گفته می‌شود که برای تنظیم یا کنترل حرکت یک بار مکانیکی با استفاده از یک موتور الکتریکی بکار می‌رود.

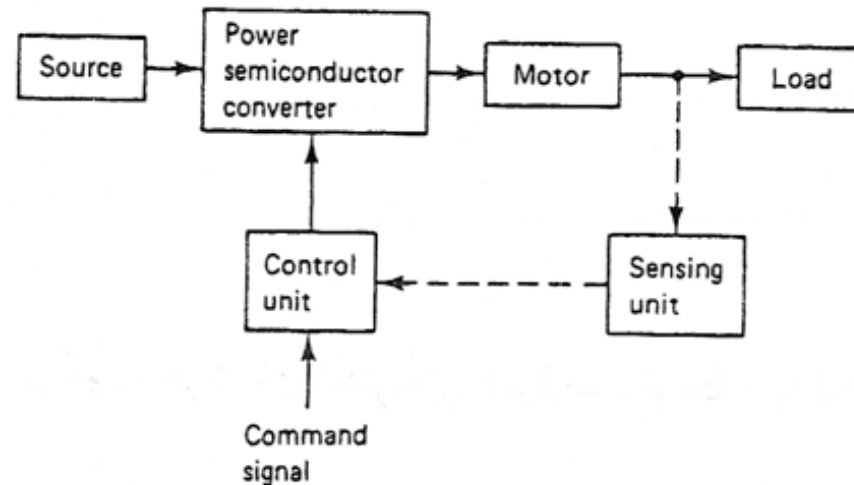
➤ **علت استفاده از درایو الکتریکی:** تنظیم سرعت یا گشتاور یا موقعیت یک بار مکانیکی.

➤ **منظور از کنترل حرکت (کنترل موقعیت/سرعت/گشتاور):** تغییرات عمدی و کنترل شده ولتاژ، جریان و فرکانس تغذیه که منجر به تغییر سرعت (گشتاور یا موقعیت) موتور در بازه مشخص و دلخواهی می‌شود.

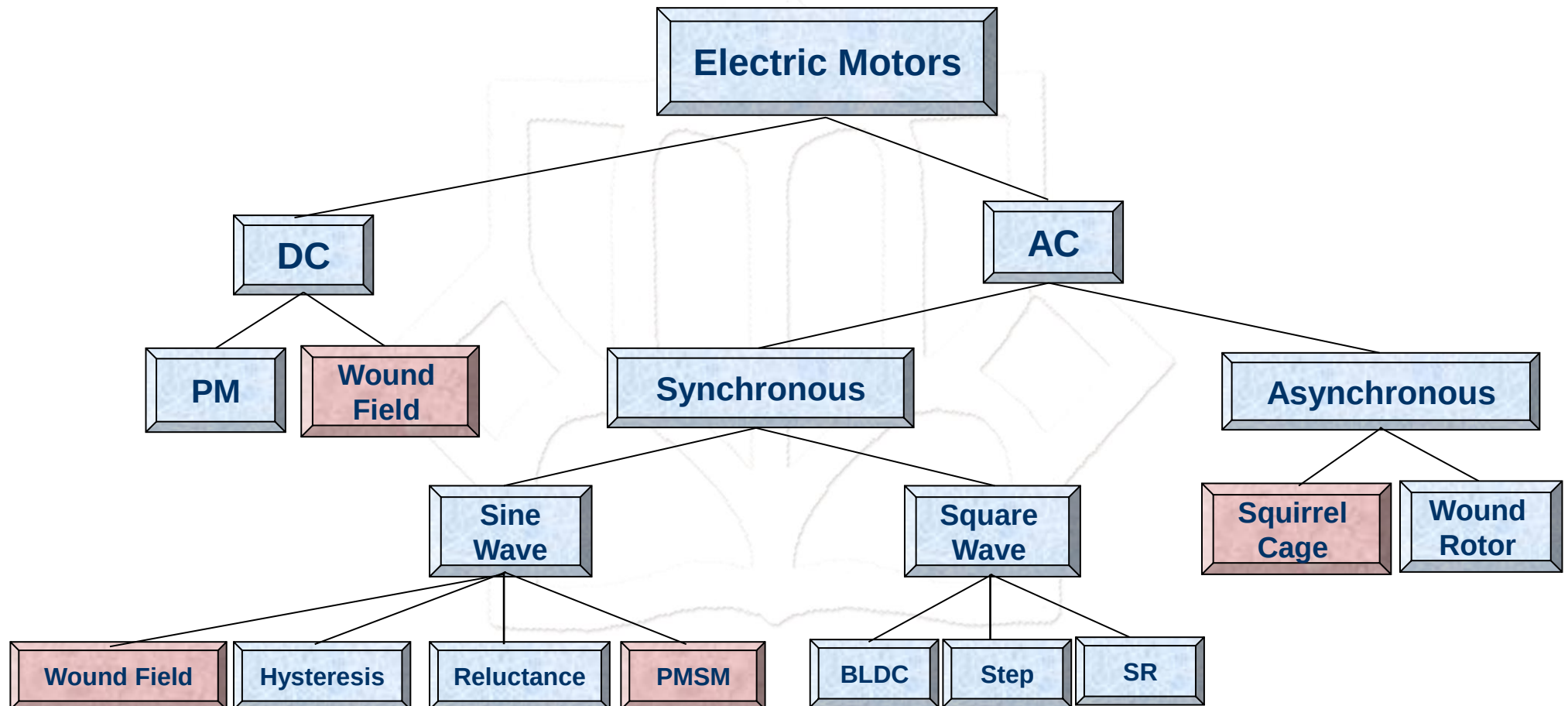
➤ **کاربردهای درایوهای الکتریکی:**

- ✓ کاربردهای حمل و نقل، قطارها و خودرویی (Automotive).
- ✓ خطوط تولید سرعت (گشتاور) متغیر نظیر صنایع فولاد، نورد، کاغذسازی، نساجی سیمان و امثالهم.
- ✓ کاربردهای لوازم خانگی
- ✓ رباتیک و ماشینهای ابزار
- ✓ دیگر کاربردها

- منبع انرژی الکتریکی (یا Source): می تواند برق DC، برق AC تکفاز یا سه فاز و یا باتری باشد.
- مبدل نیمه هادی قدرت: انتقال قدرت از منبع به موتور تنظیم تغذیه موتور به نحوی که مشخصه های موتور در مقادیر مطلوب قرار گیرند.
- موتور: مبدل انرژی الکترومکانیکی که توان الکتریکی را به توان مکانیکی (کار) تبدیل می کند.
- واحد اندازه گیری: تشخیص و شناسایی پارامترهای خاصی از موتور نظیر جریان، ولتاژ، گشتاور، سرعت و غیره را انجام می دهد.
- واحد کنترل: در این واحد، با توجه به فیدبکهای ارسال شده توسط واحد اندازه گیری، فرمانهای کنترلی مبدل ساخته می شوند.



بلوک دیاگرام کلی درایو الکتریکی

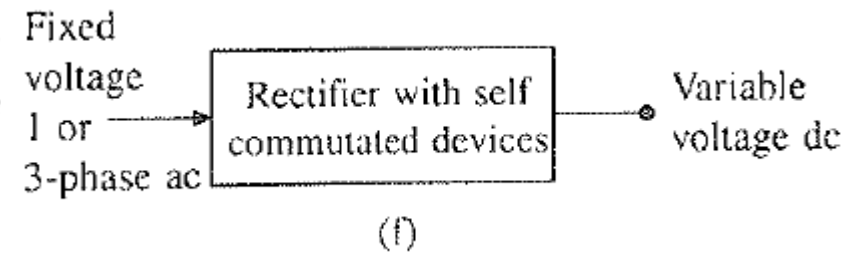
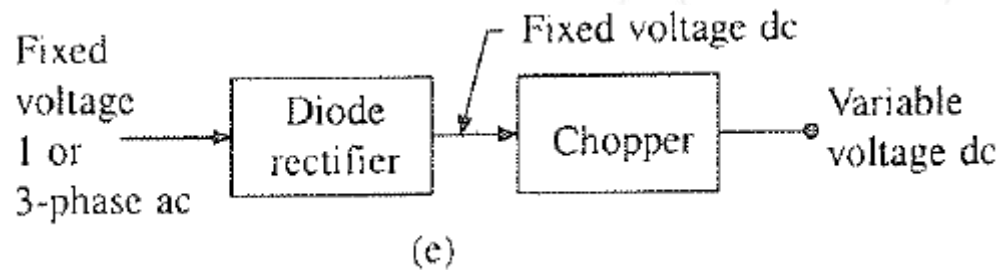
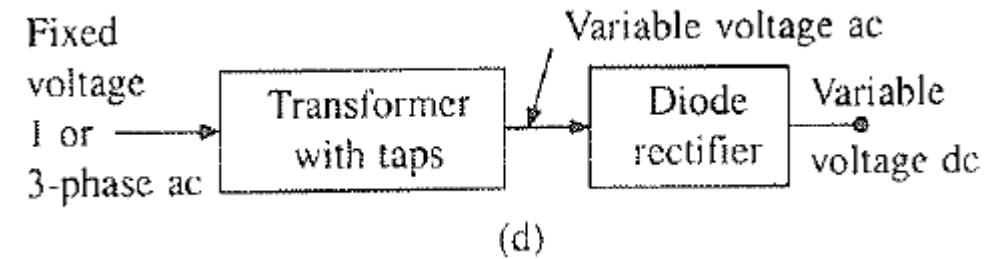
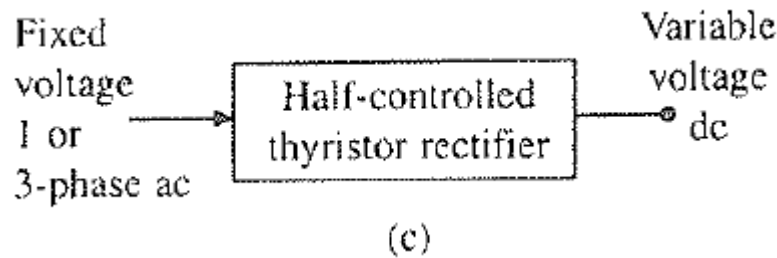
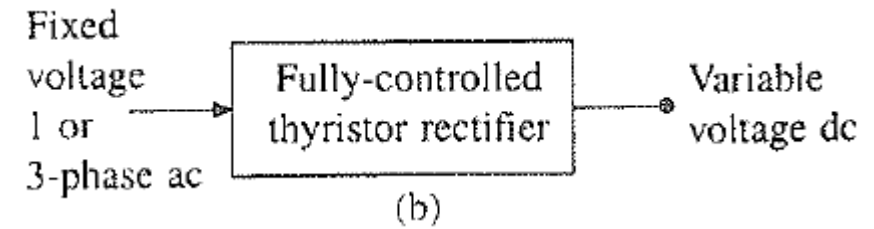
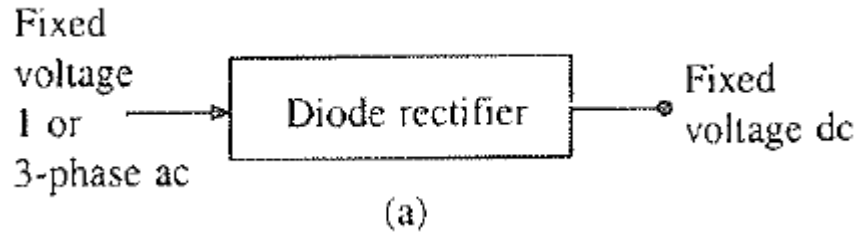


انواع متداول موتورهای الکتریکی

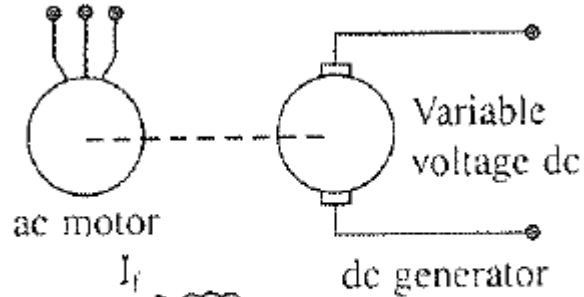


انواع مبدل های مورد استفاده در درایوهای الکتریکی و کاربرد هر یک از آنها

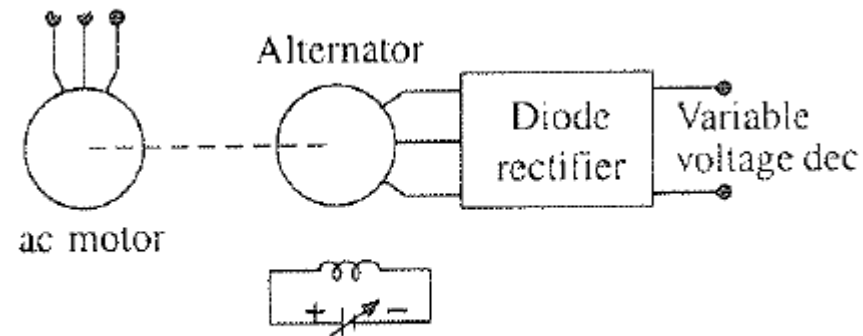
نوع مبدل	نحوه تبدیل انرژی الکتریکی	کاربردها
۱ - یکسوکننده های قابل کنترل	تبدیل ac به dc	کنترل موتورهای dc ، القایی و سنکرون
۲ - برشگرها	ولتاژ dc ثابت به ولتاژ dc متغیر	کنترل موتورهای dc و القایی
۳ - کنترل کننده های ولتاژ ac	ولتاژ ac ثابت به ولتاژ ac متغیر در فرکانس یکسان	کنترل موتورهای القایی
۴ - اینورترها (با منبع ولتاژ یا منبع جریان)	تبدیل منبع dc به منبع ac جریان یا ولتاژ با فرکانس ثابت یا متغیر	کنترل موتورهای القایی و موتورهای سنکرون
۵ - سیکلوکنورترها	تبدیل منبع ac با ولتاژ و فرکانس ثابت به ولتاژ ac با دامنه و فرکانس متغیر	کنترل موتورهای القایی و سنکرون



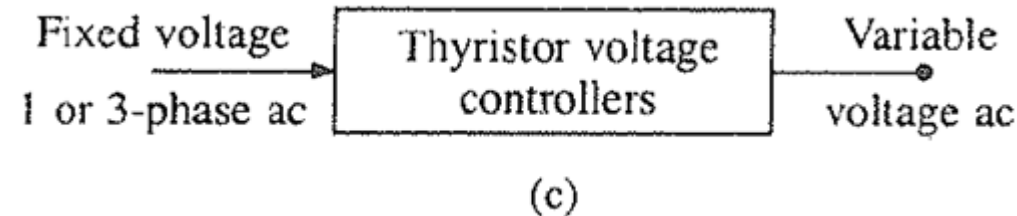
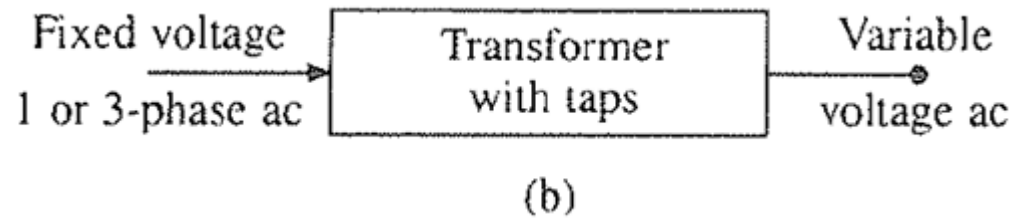
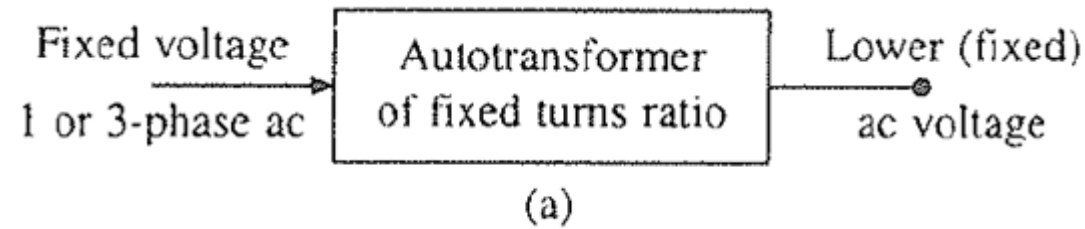
Fixed voltage ac

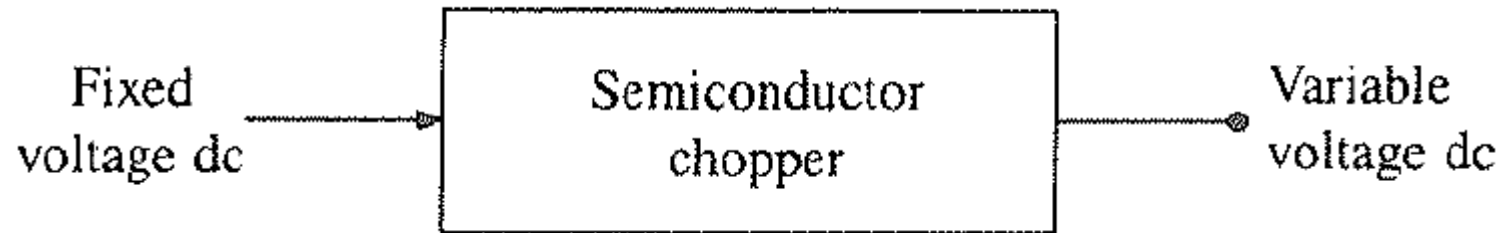


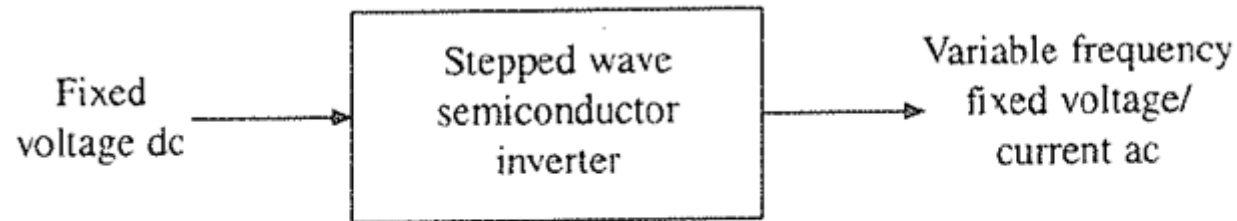
(g)



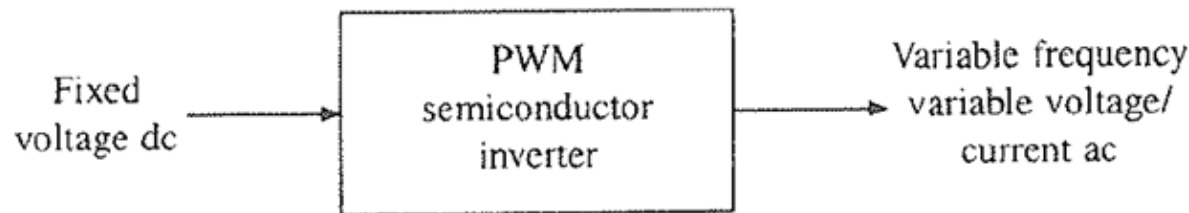
(h)







(a) Stepped wave inverters



(b) Pulse width modulated inverters

Fig. 1.5 Inverters

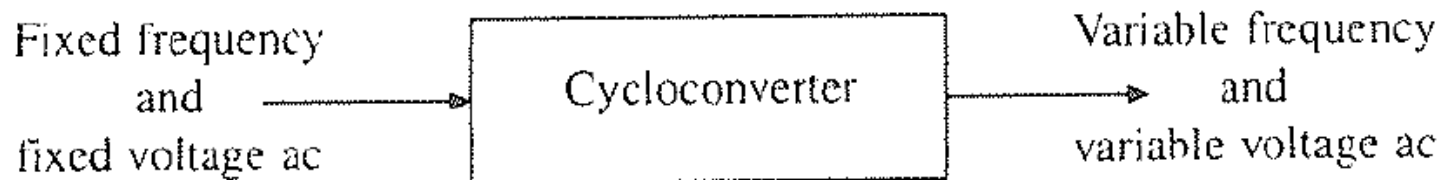


Fig. 1.6 Cycloconverter

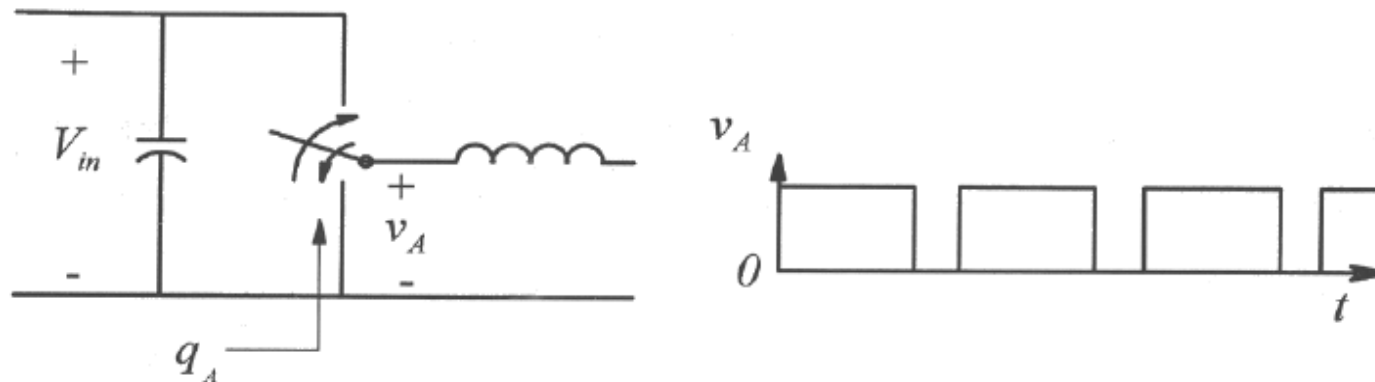
✓ عناصر نیمه هادی قدرت مورد استفاده در محرکه های (درایوهای) الکتریکی به عنوان سوئیچ کنترل شده جهت قطع و وصل جریان به کار می روند.

✓ لذا ناحیه عملکردی عناصر نیمه هادی، ناحیه اشباع است و این عناصر هیچگاه در حالت هدایت قرار نمی گیرند.

✓ ولتاژ این عناصر در حالت وصل برابر با ولتاژ اشباع آنهاست که بسته به نوع سوئیچ از ۱ ولت تا ۵ ولت می باشند.

❖ معیارهای انتخاب یک عنصر نیمه هادی برای یک مدار الکترونیک قدرت:

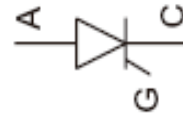
- (1) توان مورد نیاز
- (2) سرعت کلیدزنی (فرکانس سوئیچینگ)
- (3) ضریب بهره بالاتر
- (4) قیمت تمام شده
- (5) تلفات کمتر



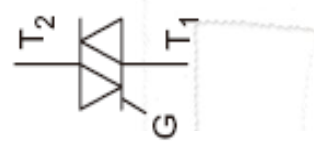
• DIODE (1955)



• THYRISTOR (1958)



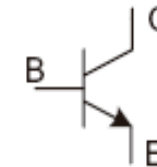
• TRIAC (1958)



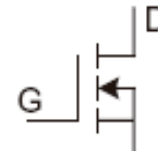
• GATE TURN-OFF THYRISTOR (GTO) (1980)



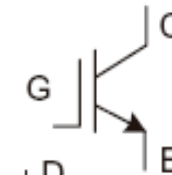
• BIPOLAR POWER TRANSISTOR (BPT or BJT) (1975)



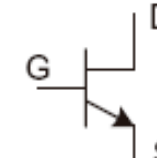
• POWER MOSFET (1975)



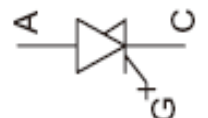
• INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR (IGBT) (1985)



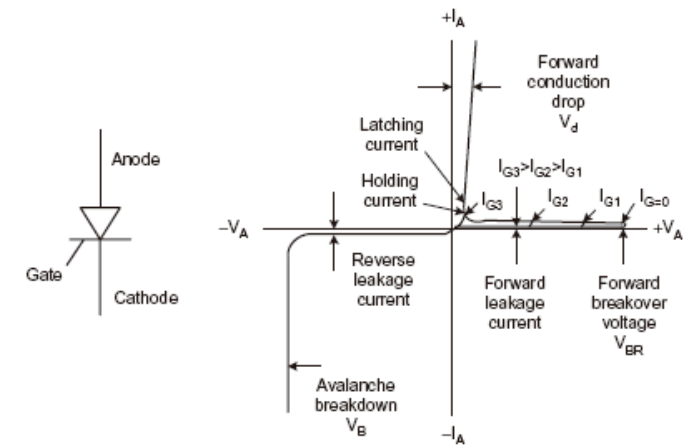
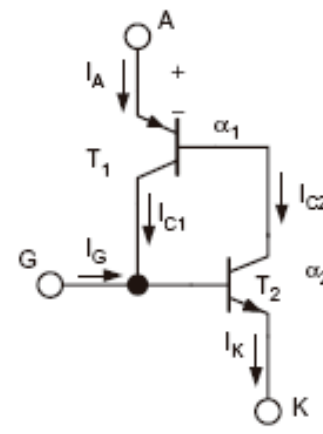
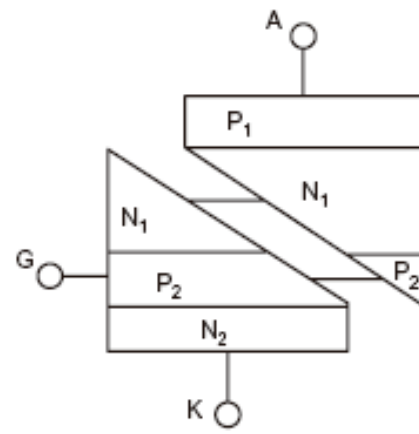
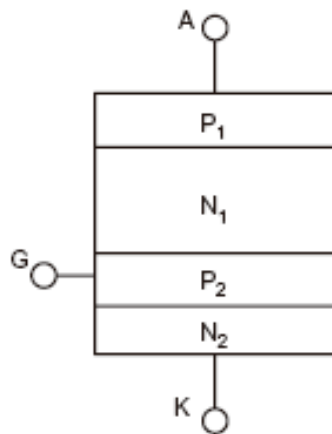
• STATIC INDUCTION TRANSISTOR (SIT) (1985)



• INTEGRATED GATE-COMMUTATED THYRISTOR (IGCT) (1996)



- ✓ تریستورها بالاترین قابلیت تحمل جریان عبوری و ولتاژ معکوس را دارند.
- ✓ تریستورهای تجاری تا ۴۰۰۰ ولت و ۳۰۰۰ آمپر هم در دسترس هستند.
- ✓ برای رسیدن به مقادیر ولتاژ و جریان بالاتر آنها را سری - موازی می کنند.



شماتیک ساختمان و مدار معادل یک تریستور

مشخصه ولت-آمپر (V-I) تریستور

ویژگی های تریستورها

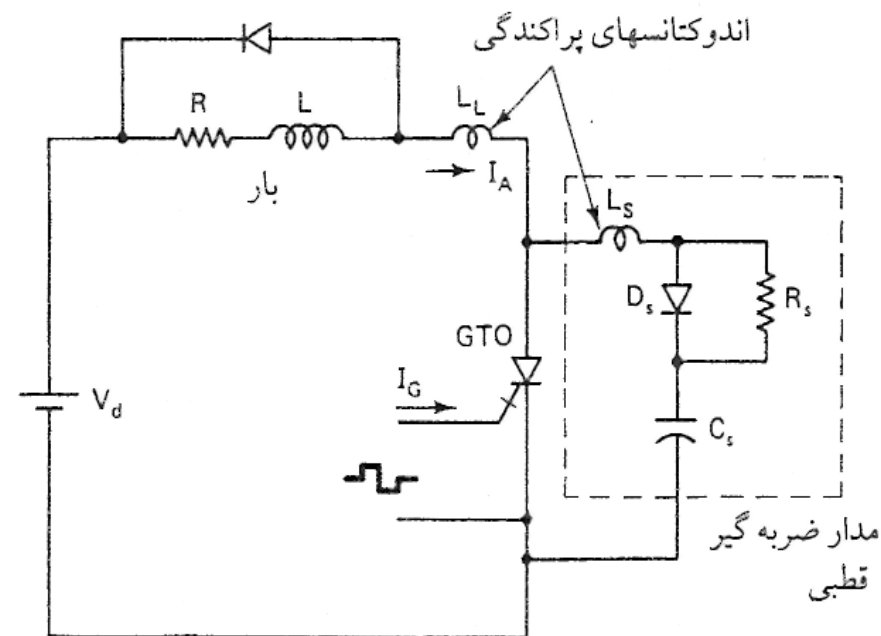
۱- توان بسیار بالا (بالاترین توان در بین تمام انواع عناصر الکترونیک قدرت)

۲- فرکانس سوئیچینگ بسیار پایین

۳- نیازمند به مدار کموتاسیون جهت قطع نمودن آن

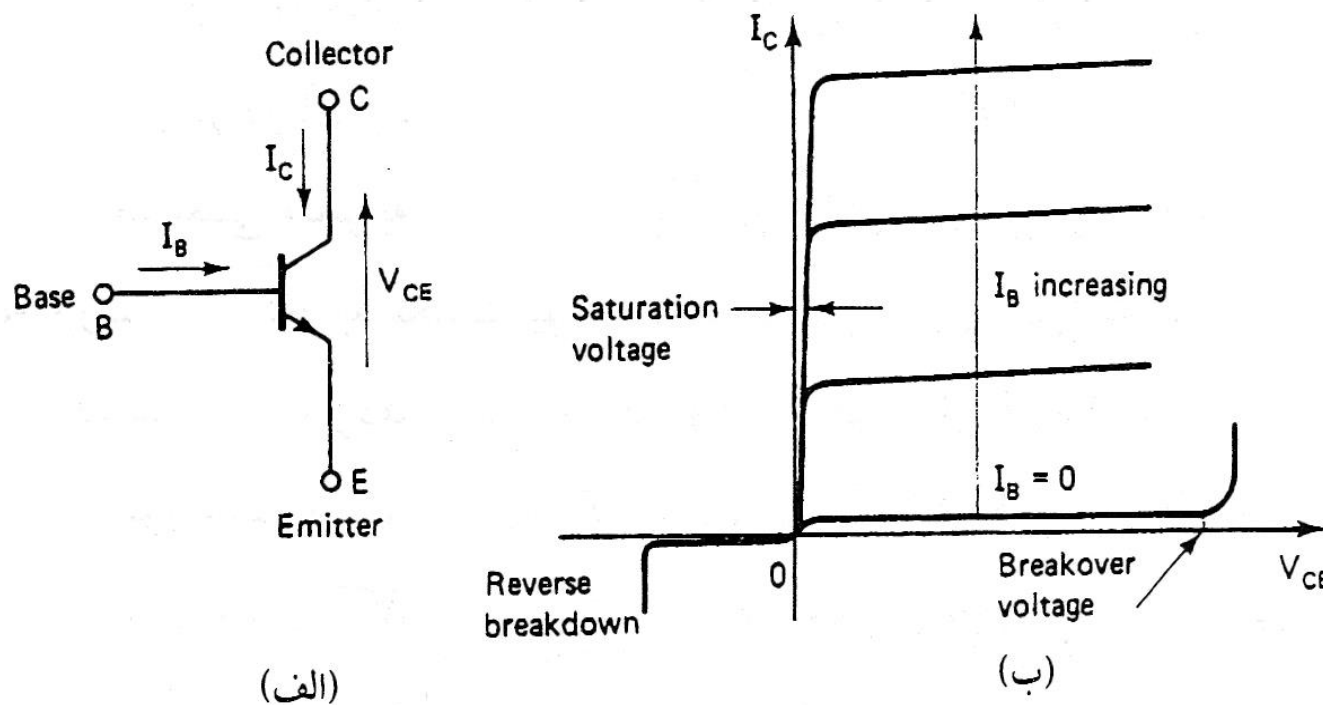


- ✓ ترستوری است که با یک پالس جریان منفی می توان آنرا خاموش نمود.
- ✓ دامنه پالس جریان مثبت برای روشن شدن کم است اما دامنه پالس منفی جهت خاموش کردن خیلی بزرگ است.
- ✓ در مجموع سرعت کلیدزنی GTO نسبت به ترستور بیشتر بوده و تلفات آن نیز نسبت به ترستور و مدارهای جانبی اش کمتر است.
- ✓ GTO های تجاری با مقادیر نامی تا ۲۵۰۰ ولت و جریان ۲۰۰۰ آمپر موجود هستند.

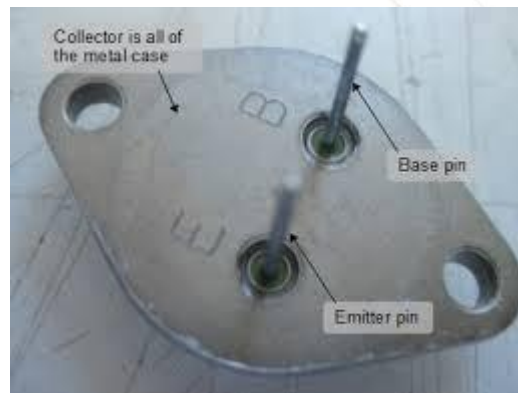
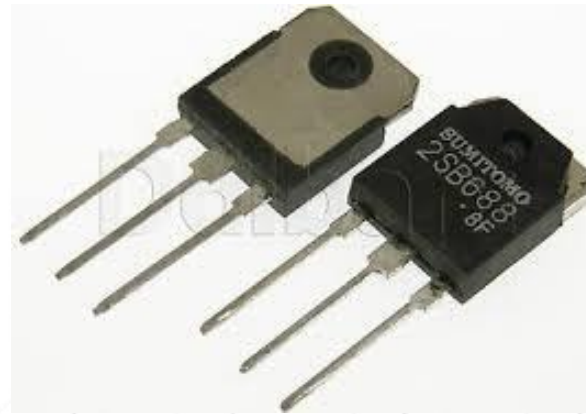


شکل ۱-۱۲ مدار برشگر با GTO و ضربه گیر قطبی

- ✓ ترانزیستورهای قدرت برای کاربرد در توان پائین تا متوسط عمومیت بیشتری دارند و با GTO و ترایستور رقابت می کنند.
 - ✓ ترانزیستور قدرت نیاز به جریان دائمی بیس دارند اما برای قطع شدن نیاز به مدار کموتاسیون ندارد.
 - ✓ BJT نسبت به ترایستور دارای مزایای: فرکانس کلیدزنی بسیار بزرگتر، مدار تحریک ساده تر و افت ولتاژ حالت وصل کوچکتر می باشد.
- اما دارای معایب: جریان بیس دائمی و بزرگتر از گیت ترایستور، تحمل ولتاژ معکوس پائین، و موازی کردن آنها به دلیل تغییرات مقاومت هدایت با افزایش دما مشکل تر است.

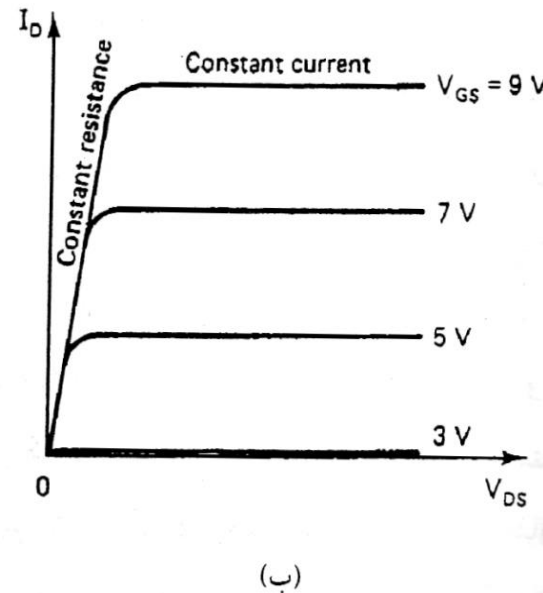
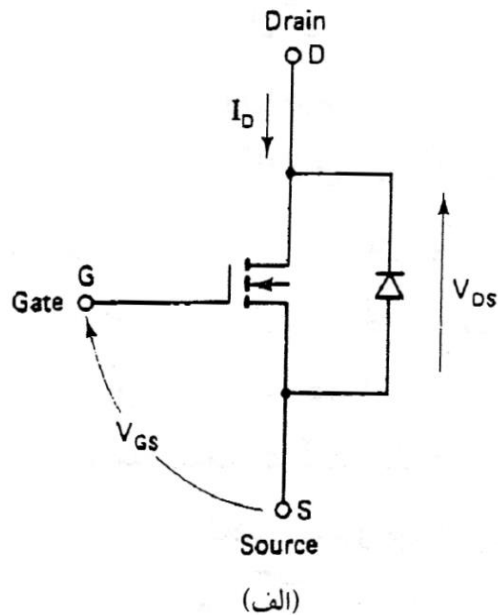


شکل ۱-۵ ترانزیستور NPN (الف) نماد مداری (ب) مشخصه های $I_C - V_{CE}$



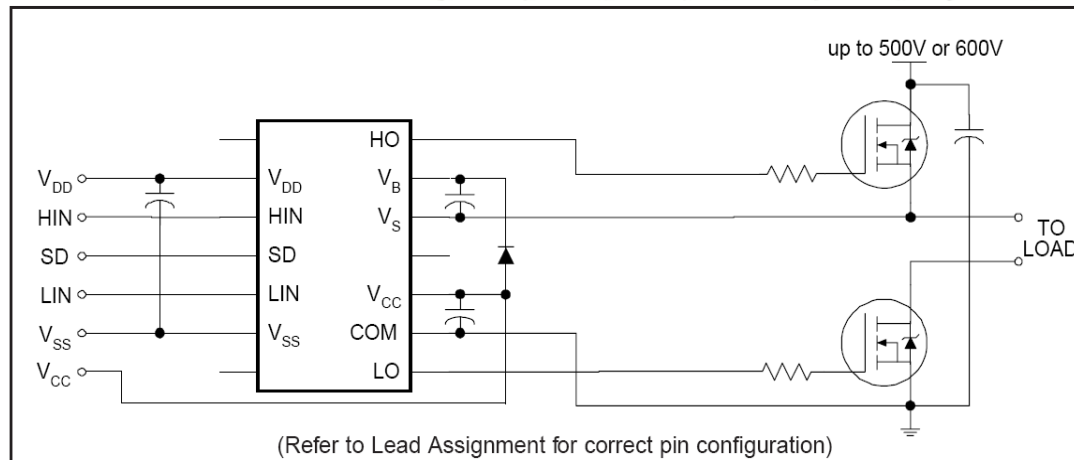
Daneshjookit.com

- ✓ ماسفت یک ترانزیستور اثر میان از نوع اکسید فلزی است که در کاربردهای توان پائین (تا حداکثر چند کیلووات) و فرکانس‌های خیلی بالا، بسیار درخشان ظاهر شده است.
- ✓ برخلاف ترانزیستور که یک عنصر کنترل شده با جریان است، ماسفت یک قطعه کنترل شده با ولتاژ (V_{GS}) است.
- ✓ با اعمال یک ولتاژ گیت-سورس (V_{GS}) به حد کافی بزرگ در حدود ۱۰ ولت، ماسفت در حالت هدایت قرار گرفته و کار مطمئن در ناحیه مقاومت ثابت حاصل می‌شود. این ناحیه متناظر با ناحیه اشباع کار ترانزیستور است.
- ✓ برای قطع جریان ماسفت کافی است ولتاژ صفر ولت به گیت اعمال شود.

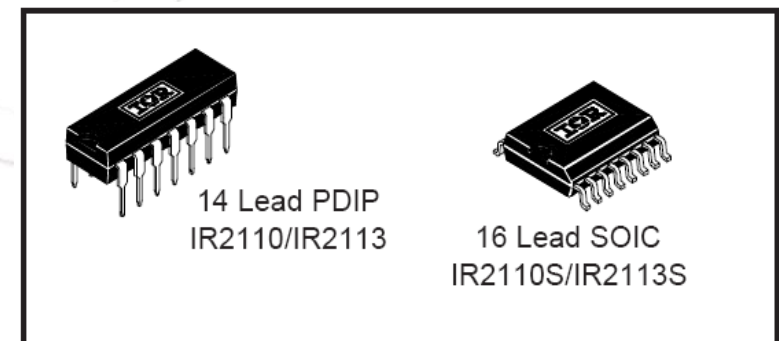


ماسفت قدرت (الف) نماد مداری (ب) مشخصه $I_D - V_{DS}$

- ✓ در کاربردهای الکترونیک قدرت، با توجه به بالا بودن سطح ولتاژ در بخش قدرت و سوئیچها و پائین بودن سطح ولتاژ بخش کنترل و محدود بودن توان خروجی آنها، از مدارهای تقویت سیگنال ولتاژ یا جریان و همچنین مدارات ایزولاسیون استفاده می شود.
- ✓ مدارات فوق را راه انداز (درایور سوئیچ) نامگذاری می کنند که برای هر سوئیچ لازم به استفاده است.
- ✓ امروزه مدارهای تحریک گیت برخی سوئیچهای به صورت مدار مجتمع (IC) به بازار عرضه شده اند که به نام آی سی سوئیچ درایور شناخته می شوند.
- ✓ در شکلهای زیر نمونه ای از درایور سوئیچ برای ماسفت قدرت و مدار مورد استفاده آنرا نمایش می دهد.



(ب) استفاده از درایور ماسفت در مدار قدرت

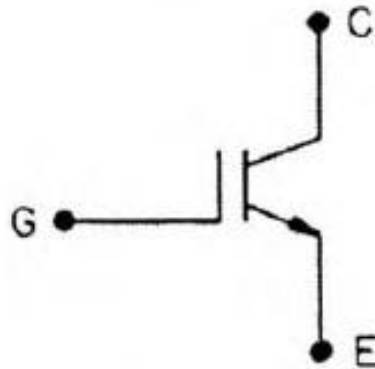
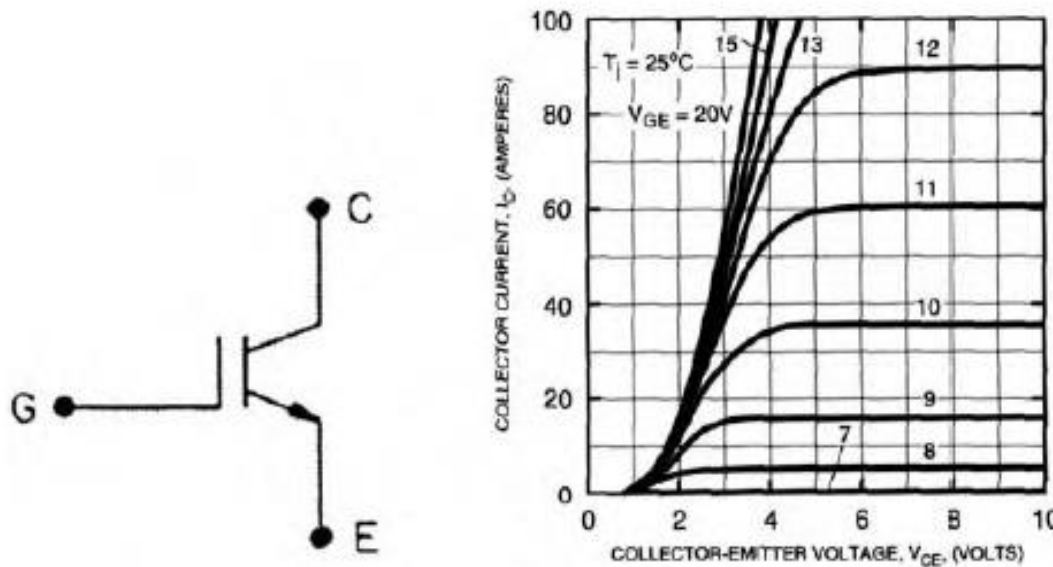


(الف) دو نوع IC درایور ماسفت قدرت رایج در بازار

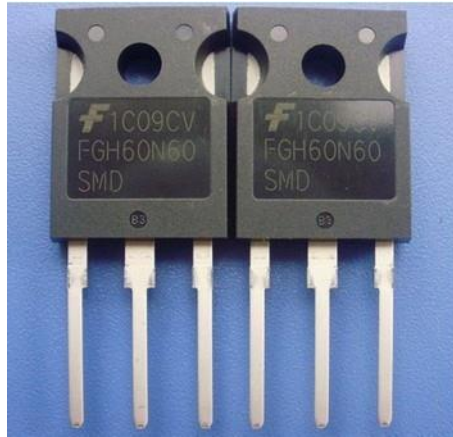
ماسفت قدرت:



- ✓ IGBT یک المان ترکیبی است که از ترکیب یک ترانزیستور قدرت و یک ماسفت بدست می آید.
- ✓ این المان، در حقیقت یک ترانزیستور دوقطبی است که در مدار محرک آن (بیس آن) یک ماسفت قرار دارد.
- ✓ IGBT هم مزایای ترانزیستور قدرت BJT و هم مزایای ماسفت قدرت را داراست.
- ✓ این المان با پالس ولتاژ ۱۰ تا ۱۵ ولت روشن شده و با اعمال پالس منفی ۵- ولت خاموش می گردد.
- ✓ IGBT برای کاربردهای توان متوسط، فرکانسهای تا حداکثر 50 kHz و راندمان بالا زیاد استفاده می شود.
- ✓ IGBT نیز نیاز به مدار تحریک گیت ولتاژی است.
- ✓ امروزه pack های ۶ تایی IGBT همراه با مدارات درایور بنام ماژول هوشمند قدرت IPM در کاربردهای سه فاز زیاد استفاده می شوند.



مدل مداری IGBT و مشخصه های V-I آن

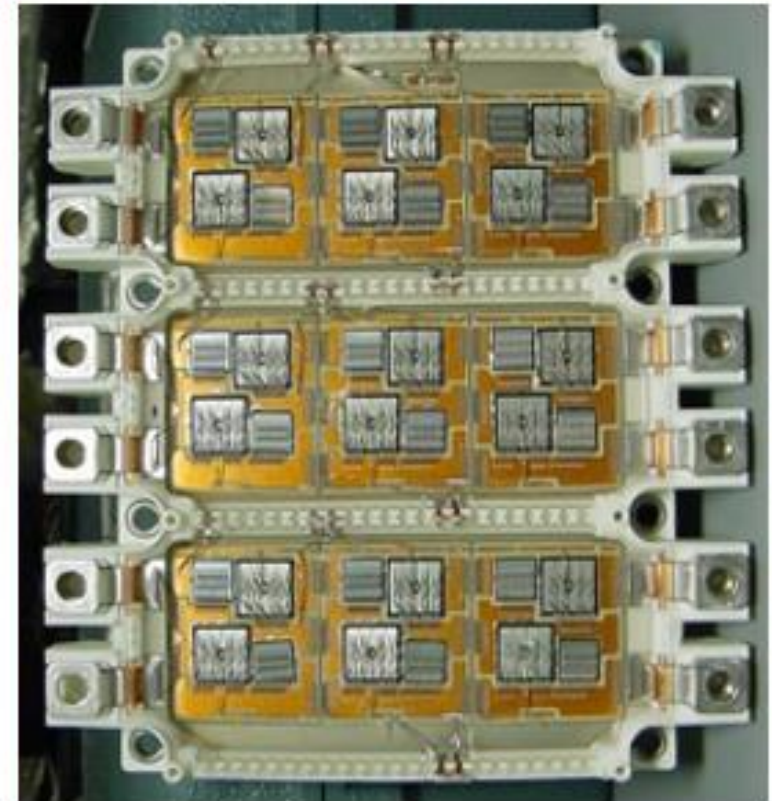
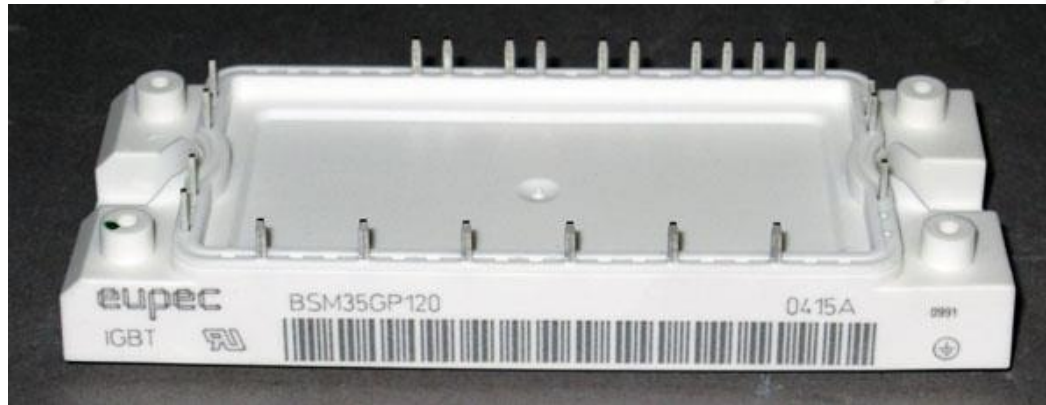


IGBT 3300V 1200A Mitsubishi



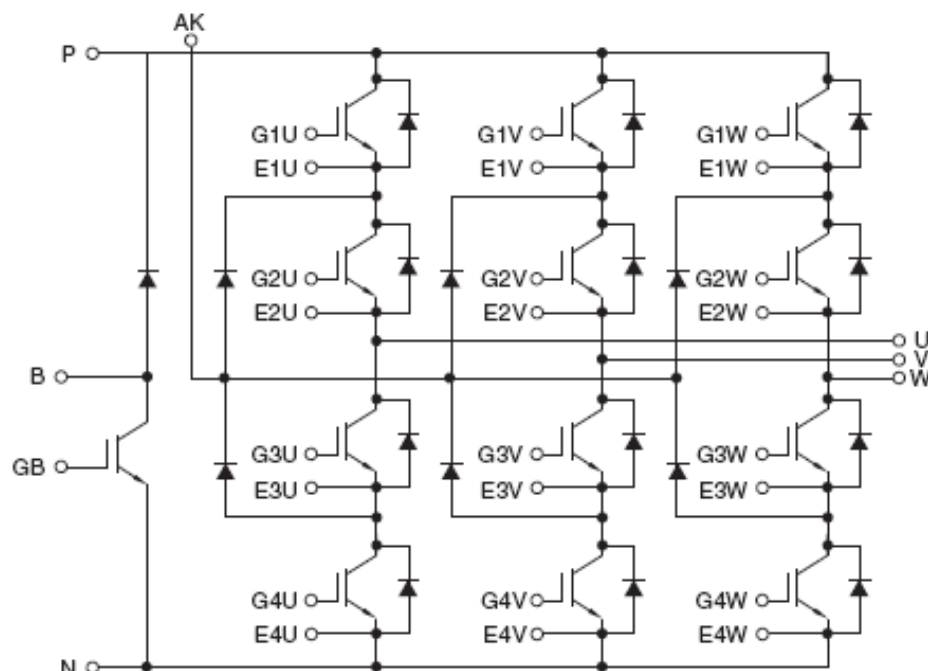
➤ ترانزیستور دو قطبی قدرت با گیت عایق شده (IGBT)

✓ برای افزایش راندمان و مجتمع سازی بیشتر، در کاربردهای توان پائین، شش سوئیچ سه پل را با یکدیگر در یک مدار جای می دهند.

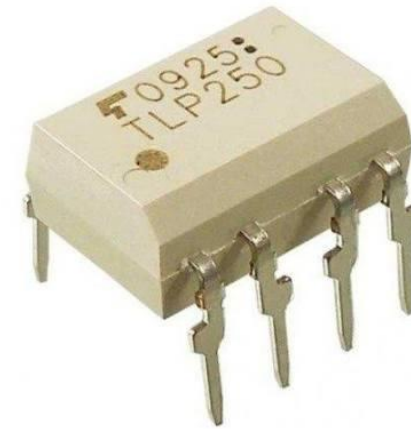
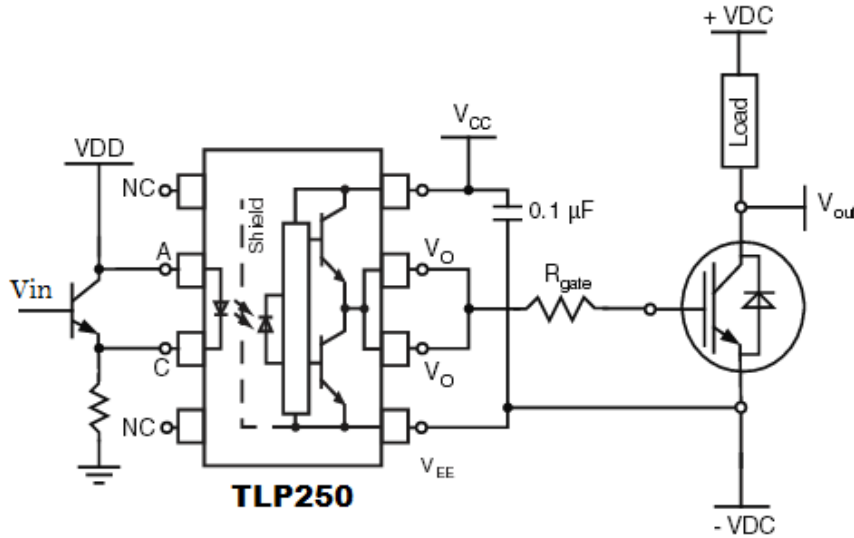


IGBT 3-phase power module, prior generation

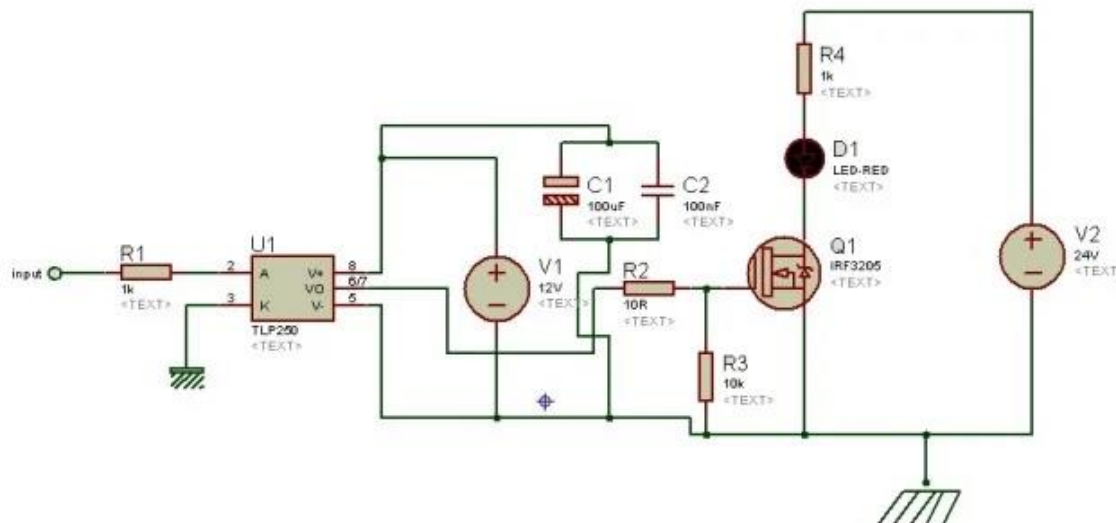
✓ با پیشرفت تکنولوژی نیمه هادی، حتی اینورترهای سه سطحی نیز مجتمع شده اند. به عبارتی ۱۲+۱ عدد IGBT را در یک مدار انتگره نموده اند.



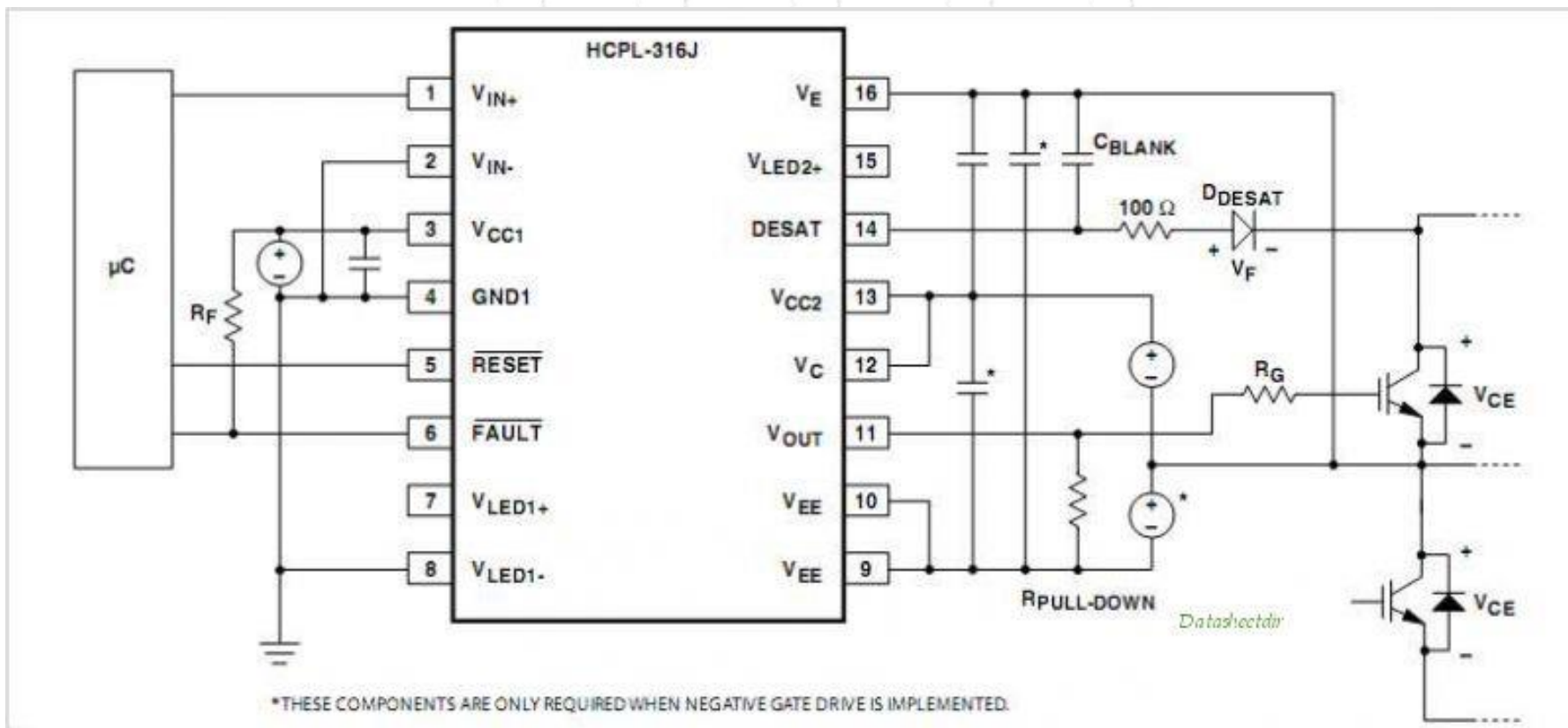
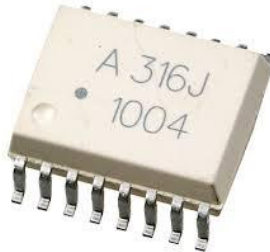
✓ برای راه اندازی یک IGBT نیز نیاز به مدارات راه انداز یا درایور است که بصورت آی سی در بازار موجود می باشند.



✓ بسیاری از درایورها هم برای ماسفت قدرت و هم برای IGBT کاربرد دارند.

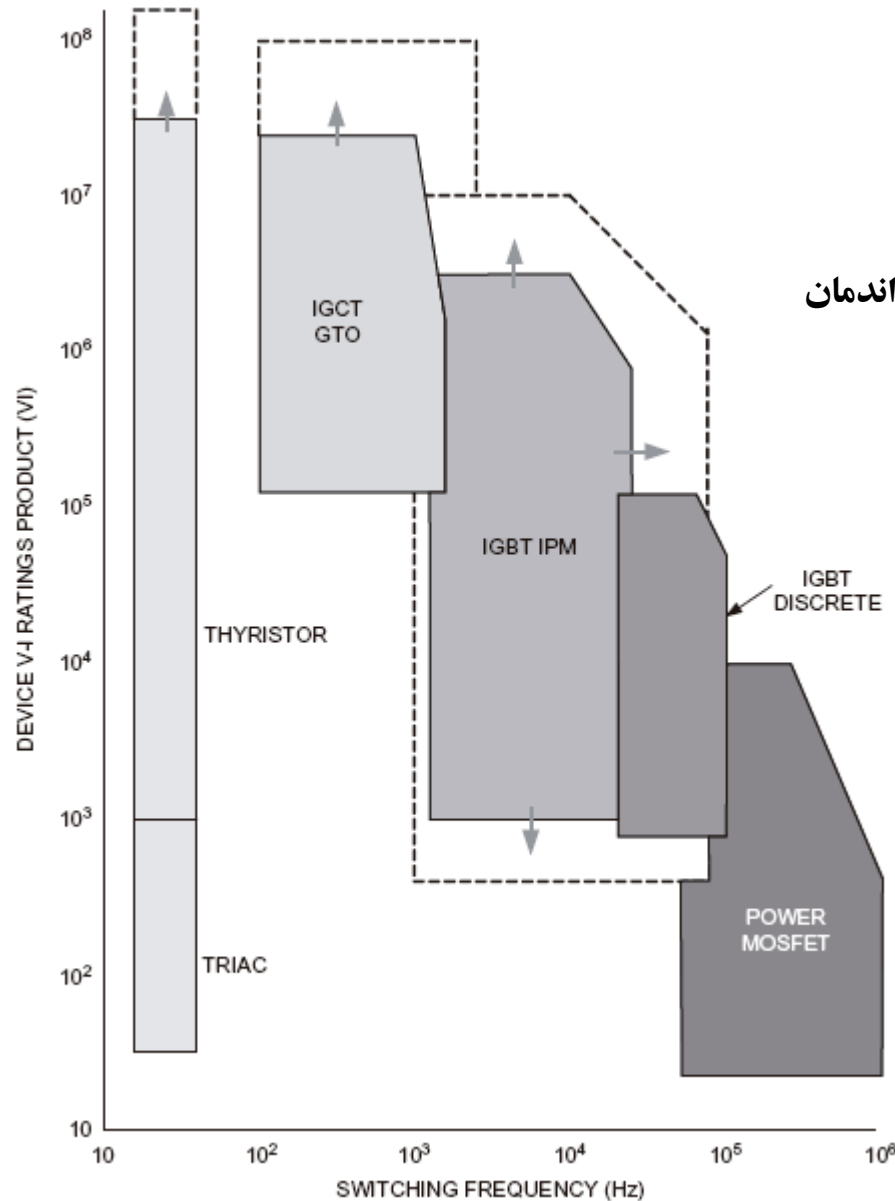


✓ برخی درایورهای سوئیچها نظیر آی سی HCPL 316J هوشمند بوده و در صورت عبور جریان بسیار زیاد از آنها، سیگنال خطا (fault) تولید می کنند.



- (1) بالاترین توان: تریستورها (SCR)
- (2) بالاترین فرکانس سوئیچینگ: ماسفت قدرت
- (3) بالاترین راندمان: IGBT

IGBT یک سوئیچ میانه از لحاظ بزرگ بودن توان، سرعت زیاد و راندمان است.





	Power MOSFET	IGBT	GTO	IGCT
1. Voltage and current ratings (selected device for comparison)	100 V, 28 A* (dc)	1.2 kV, 50 A* (dc)	6 kV, 6000 A* (pk)	4.5 kV, 4000 A* (pK)
2. Present power capability	1.2 kV, 50 A	3.5 kV, 1200 A or higher	6 kV, 6000 A	6.5 kV, 3000 A
3. Voltage blocking	Asymmetric	Asymmetric*	Asymmetric/symmetric	Asymmetric/symmetric
4. Gating	Voltage	Voltage	Current	Current
5. Junc. Temp. range	-55 to 175	-20 to 50	-40 to 125	-40 to 125
6. Safe operating area (°C)	Square	Square	2 nd breakdown	Square
7. Conduction drop (V) at rated current	2.24	2.65	3.5	2.7
8. Switching frequency	10 ⁶ Hz	1 kHz - 20 kHz	400 Hz	1.0 kHz
9. Turn-off current gain	—	—	4 to 5	1
10. Turn-on di/dt	—	—	500 A/μs	3,000 A/μs
11. Turn-on time	43 ns	0.9 μs	5 μs	2 μs
12. Turn-off time	52 ns	2.4 μs	20a μs	2.5 μs
13. Snubber	Yes or No	Yes or No	Yes (heavy)	Yes or No
14. Protection	Gate control	Gate control	Gate control or very fast fuse	Gate control or very fast fuse
15. Applications	Switching power supply Low-power motor drive	Motor drive UPS, induction heating, etc.	Motor drives SVC, etc. $dv/dt = 1000 \text{ V}/\mu\text{s}$	Motor drives HVDC, SVC etc. Built-in diode
16. Comments	Body diode can carry full current but sluggish ($t_{rr} = 150 \text{ ns}$) $I_{pk} = 56 \text{ A}$	Large power range Very important device currently * Reverse blocking available	High uncontrollable surge current	High uncontrollable surge current $dv/dt = 4000 \text{ V}/\mu\text{s}$
	*Harris IRF140	*Powerex PM50RVA120 7-pack IPM	*Mitsubishi -FG6000AU-120D	*ABB 5SHY35L4512

- ✓ اگر یک ماشین الکتریکی بصورت موتوری و فقط در یک جهت بچرخد بطور قراردادی علامت سرعت و گشتاور آنرا مثبت فرض می کنیم.
- ✓ همچنین، در محرکه های الکتریکی، یک موتور (با داشتن گشتاور مثبت) می تواند در دو جهت راستگرد (مثبت) و چپگرد (منفی) بچرخد.
- ✓ در محرکه های پیشرفته ماشین الکتریکی بصورت ژنراتور نیز می تواند عمل کند که برای آن دو جهت مثبت و منفی در نظر می گیریم.

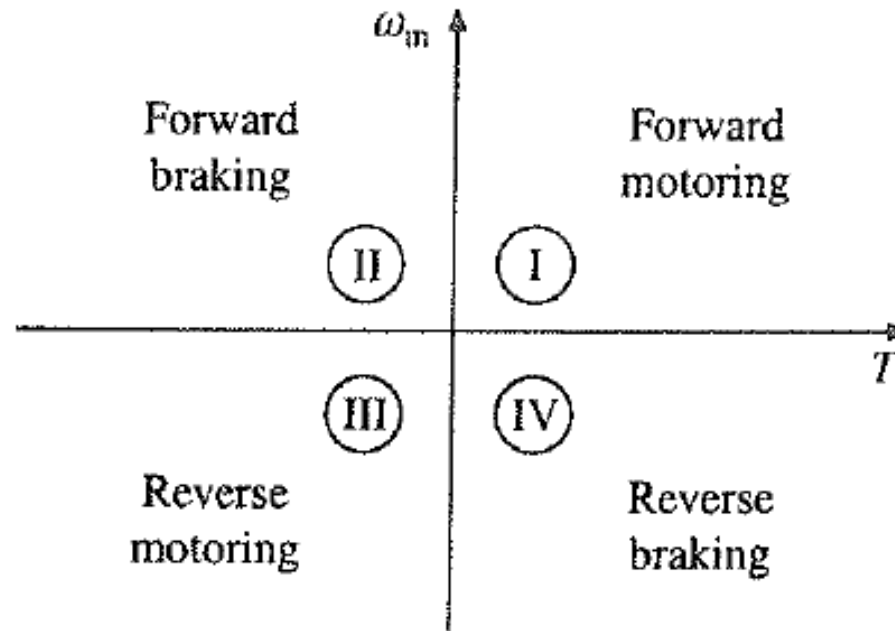
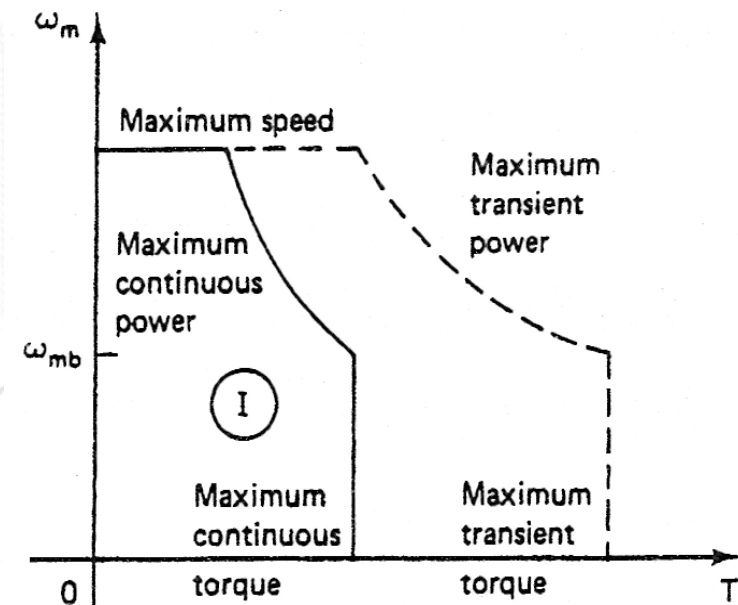
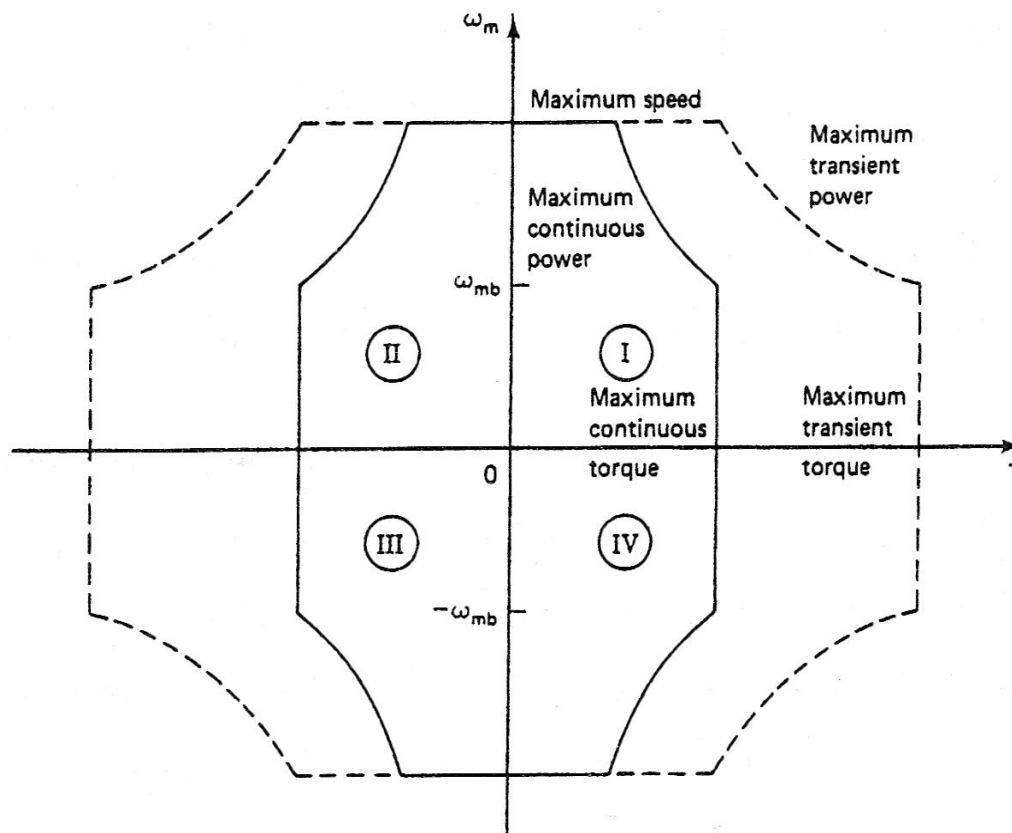


Fig. 2.2 Multiquadrant-operation of drives

- ✓ در عملکرد موتوری، علامت توان (حاصلضرب سرعت در گشتاور) همواره مثبت است، اما در عملکرد ژنراتوری این علامت منفی است.

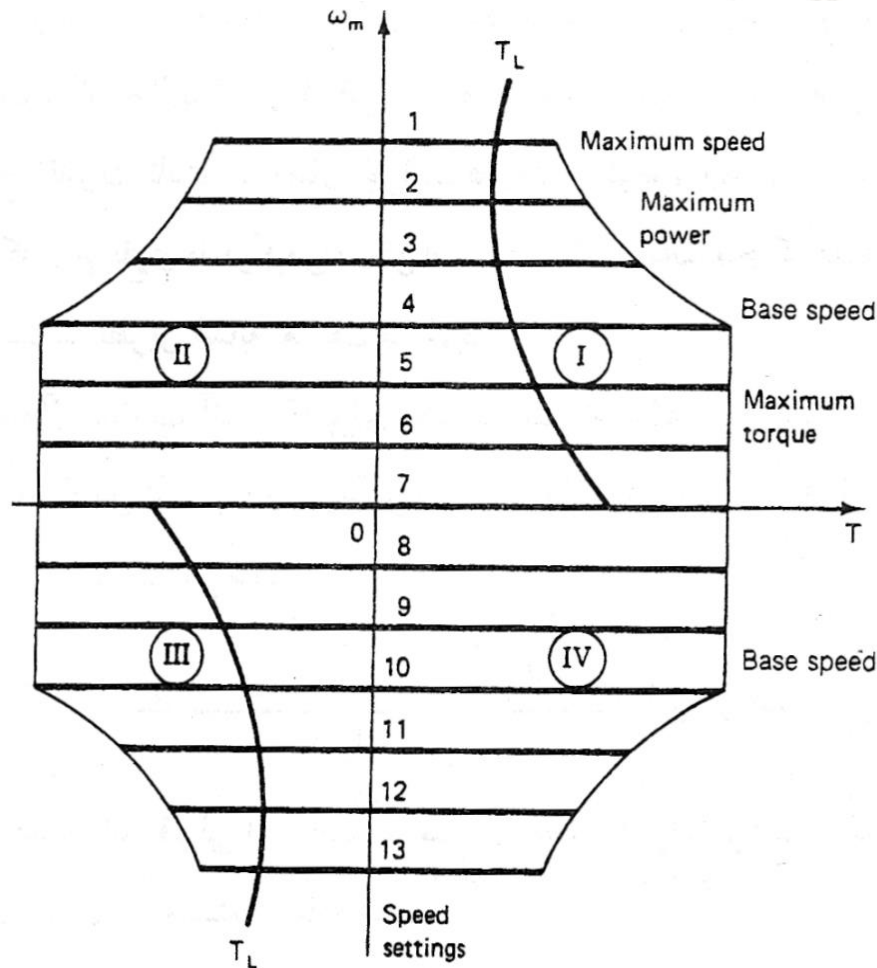
- ✓ خطوط توپر نشان دهنده ماکزیمم حدود سرعت، گشتاور و توان یک محرکه برای حالت دائمی هستند.
- ✓ برای دستیابی به پاسخ گذاری سریع، محرکه اجازه دارد تا برای مدت زمان محدودی فراتر از حدود حداکثر دائمی خود کار کند.



محدوده‌های ماکزیمم گشتاور و قدرت محرکه‌ها در حالات کار مداوم و گذرا در چهار ربع

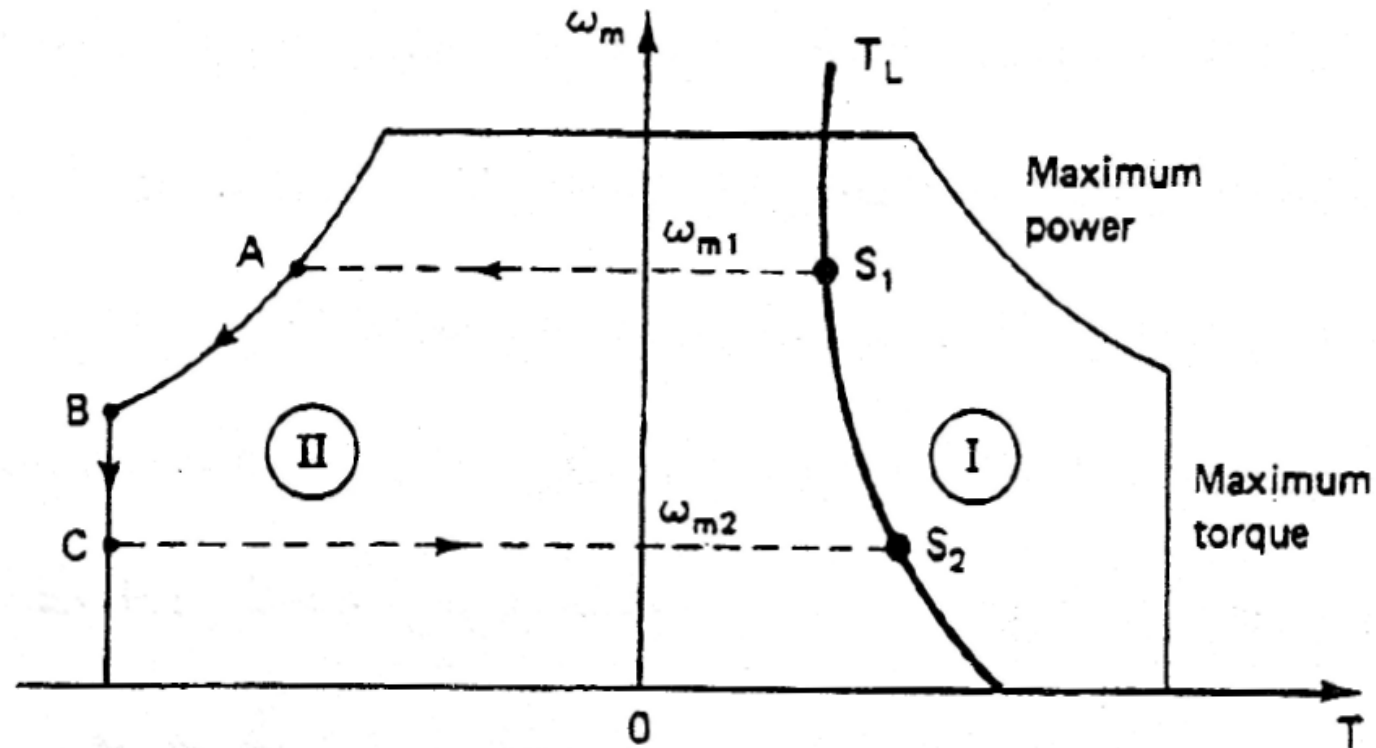
✓ می توان با استفاده از عملکرد چهار ربعی محرکه، تغییرات زیر را در حداقل زمان انجام داد:

- ۱- کاهش سرعت در همان جهت چرخش
- ۲- معکوس شدن سرعت
- ۳- افزایش سرعت در همان جهت چرخش

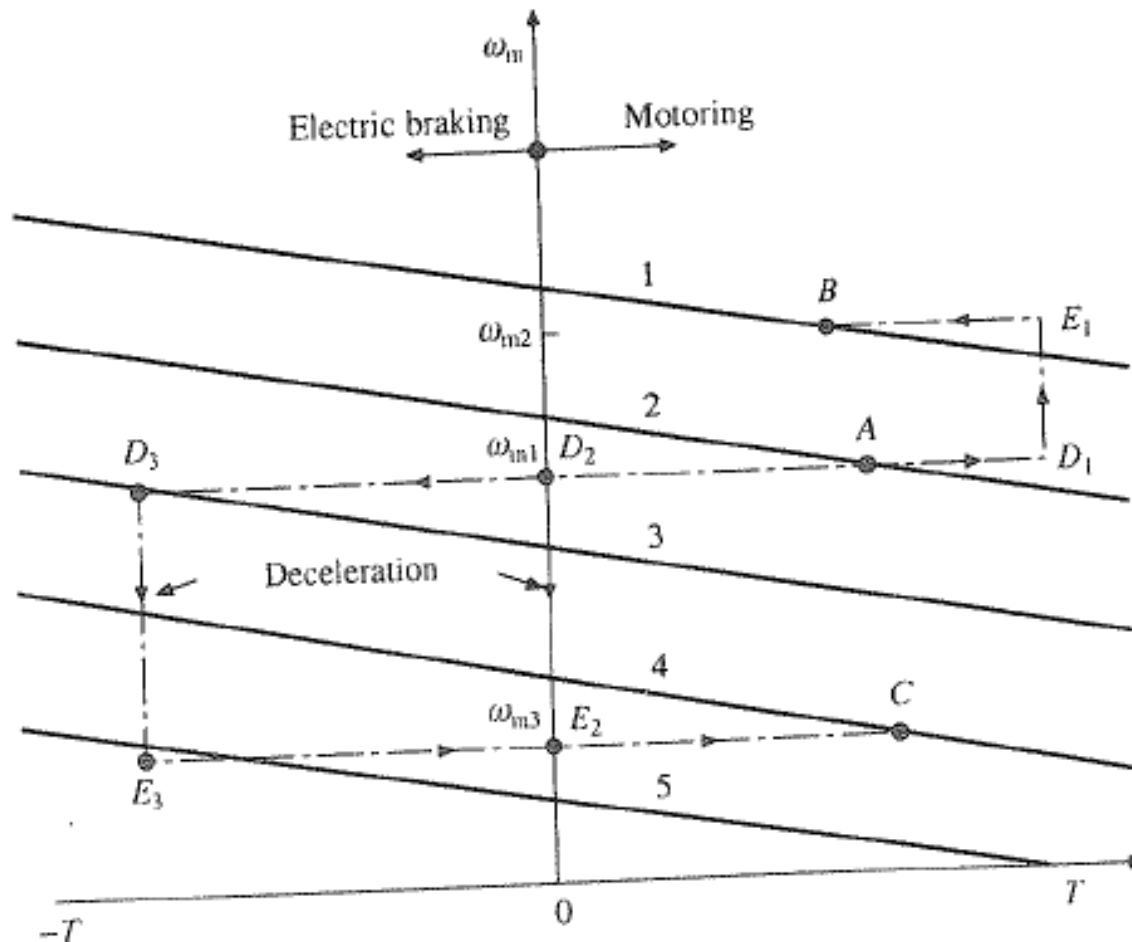


شکل ۱ - ۸ منحنی های سرعت - گشتاور موتور برای سرعت های تنظیمی مختلف همراه با مشخصه بار

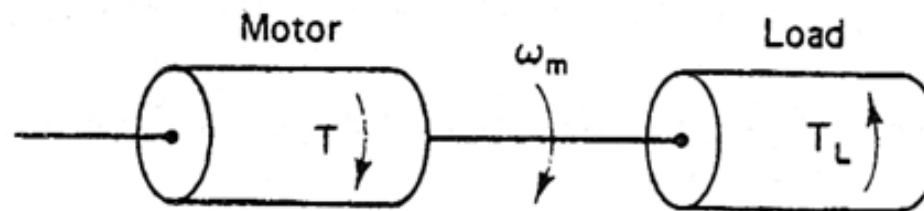
✓ برای کاهش سرعت از نقطه S_1 برای مدت کوتاهی، موتور با حداکثر توان و گشتاور در ناحیه ترمزی کار خواهد نمود و پس از رسیدن سرعت به مقدار دلخواه با تغییر عملکرد مبدل به موتوری، به نقطه کار جدید S_2 خواهیم رسید.



✓ مثلاً برای کاهش سرعت از نقطه A به نقطه C، با منفی کردن گشتاور (با تغییر جهت جریان تحریک یا جریان آرمیچر)، موتور به حالت ترمزی می رود و سرعت کاهش می یابد. پس از آن مجدد گشتاور مثبت مورد نیاز برای چرخش در نقطه C و به ازای گشتاور بار موجود، ایجاد می شود.



- انتخاب عناصر یک درایو الکتریکی باید با یکدیگر همخوانی داشته باشند.
- مهمترین همخوانی باید بین موتور و بار وجود داشته باشد. به عبارتی مشخصه‌های سرعت-گشتاور بار و موتور باید تطابق داشته باشند.
- برای این منظور ابتدا انواع بارها باید شناسایی شوند.

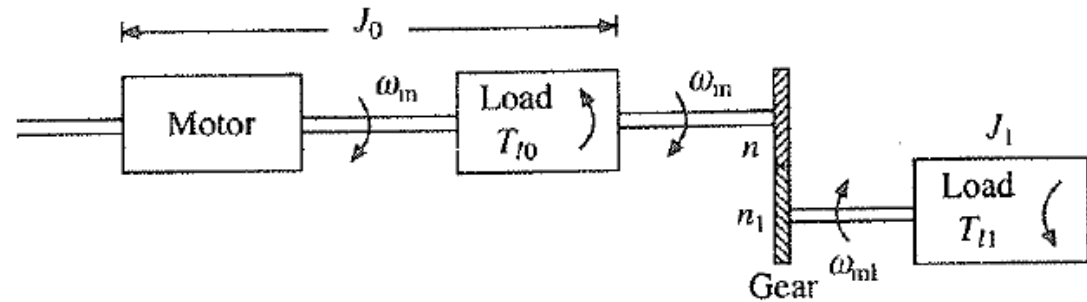


$$T = J \frac{d \omega_m}{dt} + T_L \quad (1)$$

- ✓ در حالت گذرای عملکرد محرکه، ممان اینرسی محور نقش اساسی در نرخ تغییر سرعت ایفا می کند.
- ✓ فرض کنید یک بار دورانی به محور موتور متصل باشد و از طریق یک گیربکس به باری دیگر وصل شده باشد:

$$\frac{\omega_{m1}}{\omega_m} = \frac{n}{n_1} = a_1 \quad (2.3)$$

$$\frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} J_0 \omega_m^2 + \frac{1}{2} J_1 \omega_{m1}^2 \quad (2.4)$$



(a) Loads with rotational motion

$$J = J_0 + a_1^2 J_1 \quad (2.5)$$

$$T_l = T_{l0} + a_1 T_{l1}$$

$$T_l = T_{l0} + \frac{a_1 T_{l1}}{\eta_1} \quad (2.7)$$

- ✓ اگر بهره گیربکس مقدار η_1 باشد، خواهیم داشت:

- ✓ برای محاسبه ممان اینرسی محور، اگر شکل محور بصورت استاندارد باشد از روابط مربوطه برای آنها می توان استفاده نمود.
- ✓ اما روشی که برای تمامی اشکال محور چرخش قابل استفاده است، روش تست است.

- ✓ در روش تست، توان متوسط ورودی به موتور طی یک دوره افزایش سرعت از صفر به ω_m محاسبه و با استفاده از فرمول زیر، J محاسبه می گردد:

P = Rate of change of kinetic energy

$$= \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J \omega_m^2 \right) = J \omega_m \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.14)$$

- ✓ یکی از مشکلات روش فوق، وجود توان تلفاتی در توان اندازه گیری شده است که باید کسر گردد.

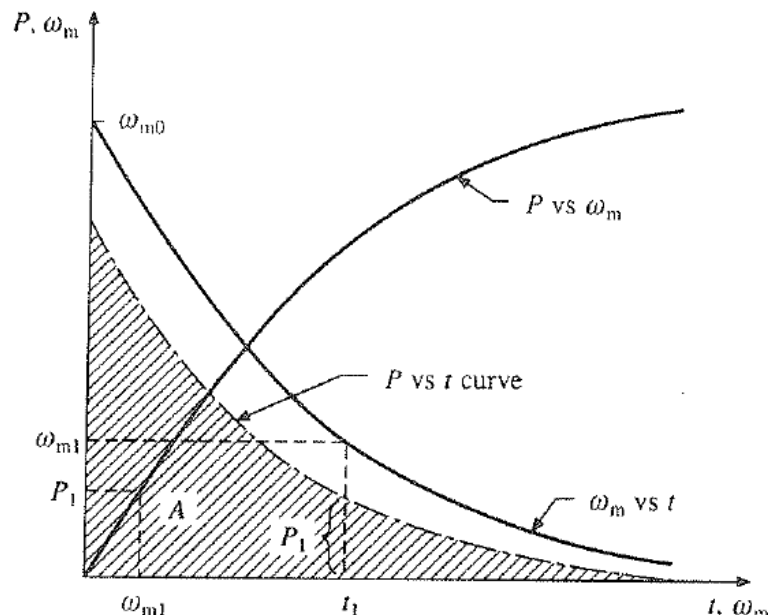


Fig. 2.5 Graphical method of determination of equivalent moment of inertia

✓ گشتاور بار شامل سه مولفه زیر است:

$$T_l = T_L + T_W + T_F$$

۱- گشتاور مورد نیاز جهت انجام کار مفید مکانیکی T_L : طبیعت و رفتار این گشتاور بسته به نوع بار دارد.

۲- گشتاور باد T_W : گشتاور مقاوم هوای داخل موتور

$$T_w = C\omega_m^2 \quad (2.17)$$

۳- گشتاور اصطکاک T_F : اصطکاک بر روی محور و یا اجزای مختلف بار

✓ مولفه های گشتاور اصطکاک:

۱- گشتاور چسبندگی یا ویسکوزیته T_v : متناسب با سرعت است. $T_v = B\omega_m$

۲- گشتاور T_c : گشتاور کولمبی که مستقل از سرعت است.

۳- گشتاور حالت سکون T_s : که با راه افتادن موتور از بین می رود.

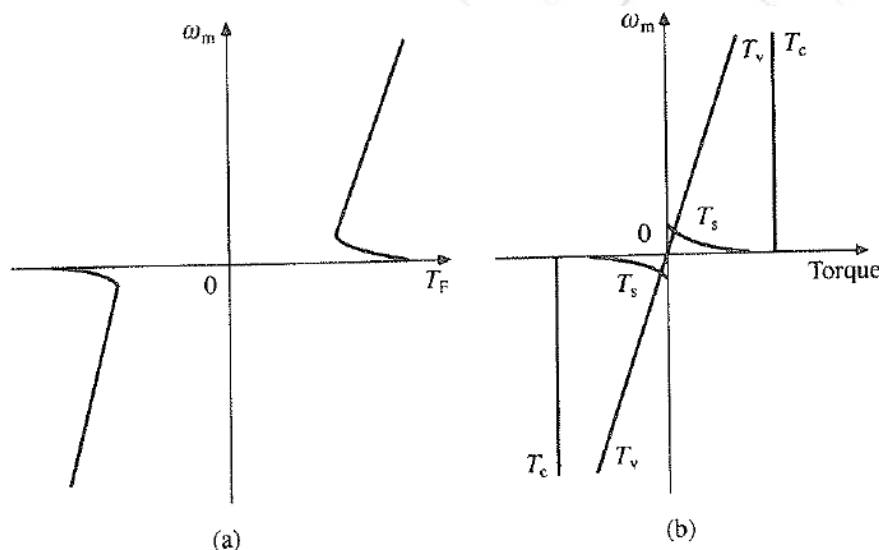


Fig. 2.6 Friction torque and its components

✓ لذا گشتاور بار برابر خواهد بود با:

$$T_l = T_L + B\omega_m + T_c + T_s + C\omega_m^2$$

✓ گشتاور اصطکاک حالت سکون T_s فقط در لحظه سکون وجود دارد و در معادلات دینامیکی ظاهر نمی گردد. لذا گشتاور بار برابر خواهد بود با:

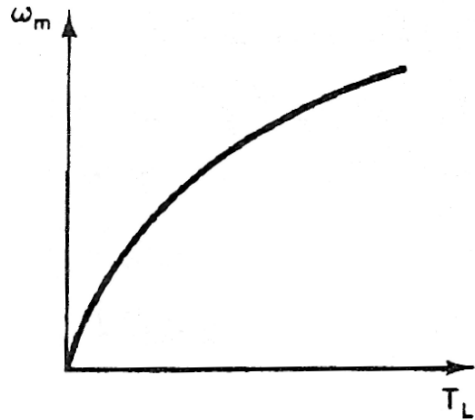
$$T_l = T_L + B\omega_m + T_c + C\omega_m^2 \quad (2.18)$$

✓ همچنین در بسیاری از کاربردها مولفه های گشتاور باد T_w و اصطکاک کولمبی T_c ناچیز هستند. لذا:

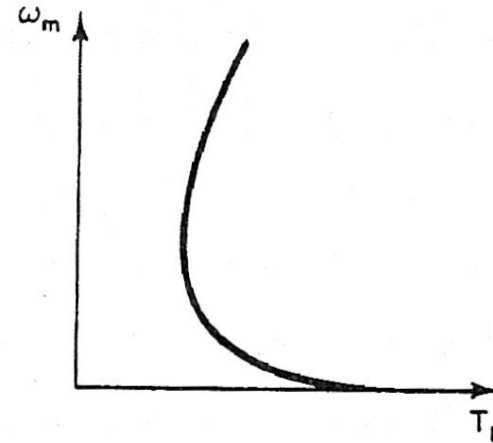
$$T_l = T_L + B\omega_m$$

✓ در نهایت معادله دینامیکی حرکت دورانی برای محاسبه سرعت بصورت زیر خواهد بود:

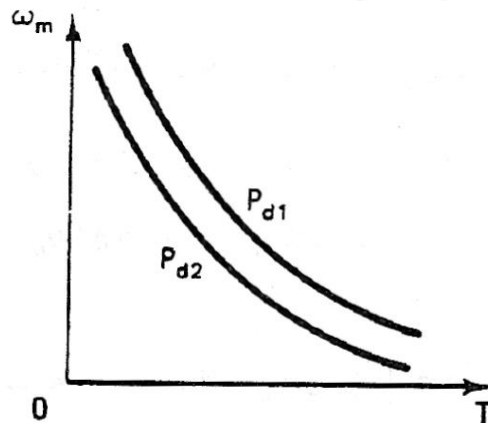
$$T = J \frac{d\omega_m}{dt} + T_L + B\omega_m \quad (2.19)$$



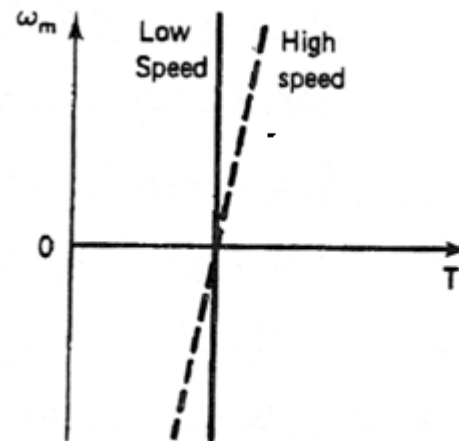
(الف) بارهای پمپه‌ای و فن‌های گریز از مرکز



(ب) بارهای کششی



(ج) محرکه‌های پیچاننده‌ها



(د) جرثقیل و بالابرها



➤ طبقه بندی انواع گشتاور بار:

۱- گشتاور بار فعال (Active)

۲- گشتاور بار غیر فعال (Passive)

✓ **گشتاور بار فعال:** گشتاوری است که علامت آن علیرغم تغییر جهت چرخش محرکه ثابت می ماند. نظیر گشتاور ناشی از کشش، فشار و پیچش و گشتاور ناشی از نیروی جاذبه.

✓ **گشتاور بار غیر فعال:** گشتاوری است که علامت آن با تغییر جهت چرخش محرکه تغییر می کند. بعبارتی این نوع گشتاور همواره با حرکت مخالف است، نظیر گشتاور اصطکاک.

- ✓ مطابق رابطه دینامیک حرکت (۱) تثبیت سرعت موتور-بار هنگامی حاصل می شود که گشتاور موتور با گشتاور بار برابر باشد.
- ✓ نقطه تعادل به شرطی پایدار است که در صورت بروز هر انحراف کوچک سرعت ناشی از هر اختلال، سرعت مجدداً به مقدار اولیه باز گردد.

- ✓ به فرض در نقطه تعادل کاری، گشتاور موتور (T_e) با گشتاور بار (T_{le}) برابر بوده و تغییرات سرعت نیز ($d\omega_{me}$) صفر باشد یعنی:

$$T_e = T_{le}, \quad \frac{d\omega_{me}}{dt} = 0 \quad (2)$$

اگر به دلیل یک اختلال در منبع یا بار انحراف سرعت $\Delta\omega_m$ ایجاد شود خواهیم داشت:

$$T_e + \Delta T = J \frac{d(\omega_{me} + \Delta\omega_m)}{dt} + T_{le} + \Delta T_l \quad (3)$$

$$\Delta T = \left(\frac{dT}{d\omega_{me}} \right) \Delta\omega_m, \quad \Delta T_l = \left(\frac{dT_l}{d\omega_{me}} \right) \Delta\omega_m \quad (4)$$

انحرافات کوچک گشتاور را می توان به اینصورت خطی سازی نمود:

$$J \frac{d(\Delta\omega_m)}{dt} + \left(\frac{dT_l}{d\omega_m} - \frac{dT}{d\omega_m} \right) \Delta\omega_m = 0 \quad (5)$$

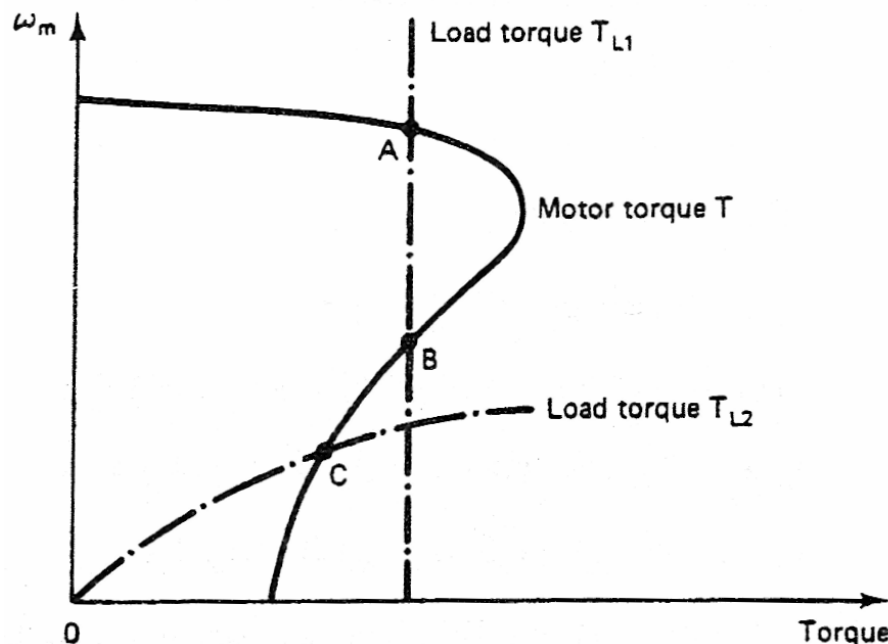
$$\Delta\omega_m(t) = (\Delta\omega_m)_0 e^{-\frac{1}{J} \left[\frac{dT_l}{d\omega_m} - \frac{dT}{d\omega_m} \right] t} \quad (6)$$

$$\left(\frac{dT_L}{d\omega_m} - \frac{dT}{d\omega_m} \right) > 0 \quad (7) \quad \text{شرط پایداری نقطه تعادل:}$$

✓ مفهوم معادله فوق آنست که:

▪ برای هر افزایشی در سرعت، گشتاور بار باید از گشتاور موتور بیشتر شود تا شتاب منفی حاصل شده و نقطه کار به نقطه تعادل باز گردد.

▪ برای هر کاهشی در سرعت، گشتاور موتور از گشتاور بار بیشتر شود تا شتاب مثبت ایجاد شده و نقطه کار به نقطه تعادل باز گردد.



مثال: در شکل مقابل، نقطه A پایدار ولی B ناپایدار است.

نقطه C نیز یک نقطه پایدار است.

نتیجه: پایداری تنها به مشخصه گشتاور-سرعت موتور بستگی

ندارد و به مشخصه بار نیز وابسته است.

➤ انواع درایوها از نظر محدوده کاری:

۱- درایوهای سرعت ثابت

۲- درایوهای سرعت متغیر

➤ انواع درایوها از نظر متغیر تحت کنترل:

۱- درایو کنترل گشتاور

۲- درایو کنترل سرعت

۳- درایو کنترل موقعیت

➤ انواع درایوها از نظر کنترلی:

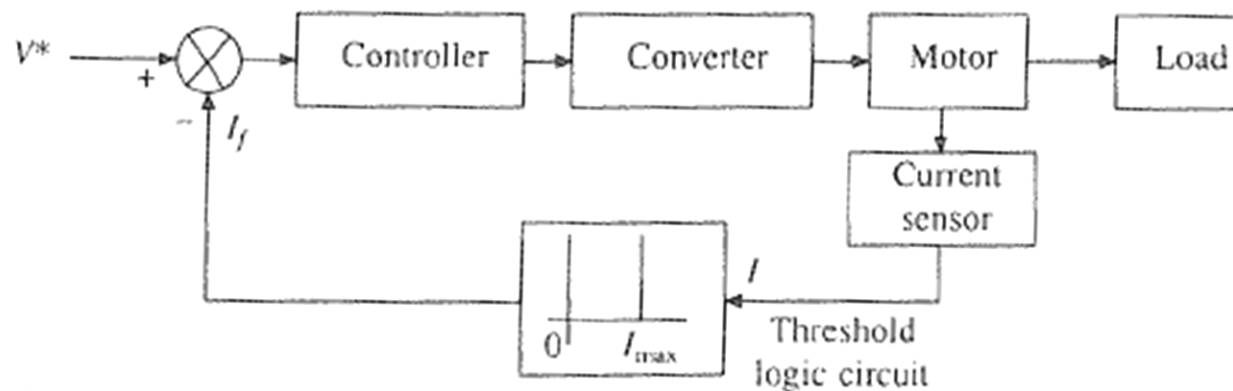
۱- درایوهای با کنترل حلقه باز: از کمیت تحت کنترلی هیچ فیدبکی گرفته نمی شود.

۲- درایوهای با کنترل حلقه بسته: یک یا چند فیدبک از موتور - بار گرفته می شود.

➤ دلایل استفاده از فیدبک

- ۱- حفاظت موتور
- ۲- افزایش سرعت پاسخ دینامیکی
- ۳- بهبود دقت عملکرد در حالت ماندگار

✓ در بسیاری از درایوهای الکتریکی حلقه بسته، علاوه بر فیدبک گرفتن از متغیر تحت کنترل مانند سرعت، جهت رسیدن به دلایل ۱ و ۲ فوق، از سایر متغیرها مانند جریان، ولتاژ، شار و یا گشتاور ممکن است فیدبک گرفته شود.

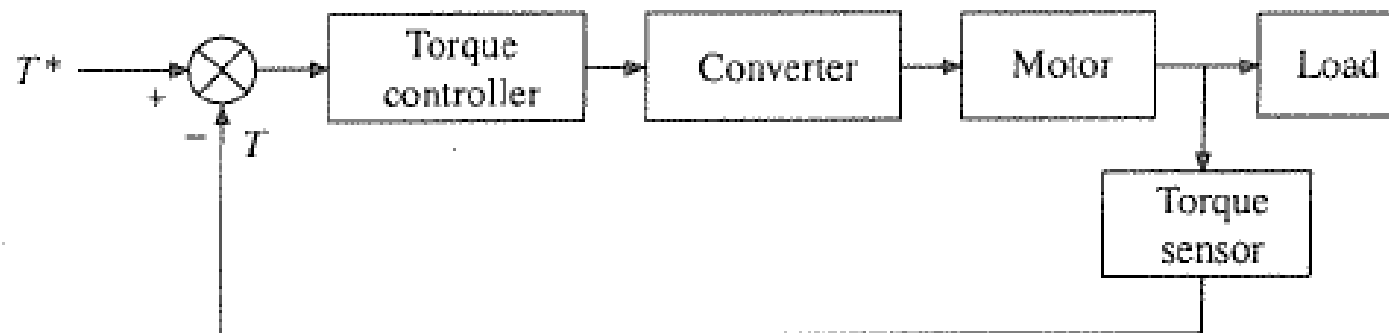


استفاده از فیدبک داخلی جریان (از نوع عملکرد حدی) برای حفاظت از موتور DC در مقابل اضافه

جریان در درایو موتور DC کنترل شده به روش تنظیم ولتاژ آرمیچر

➤ درایوهای با کنترل حلقه بسته: مثالی از درایو با فیدبک گشتاور

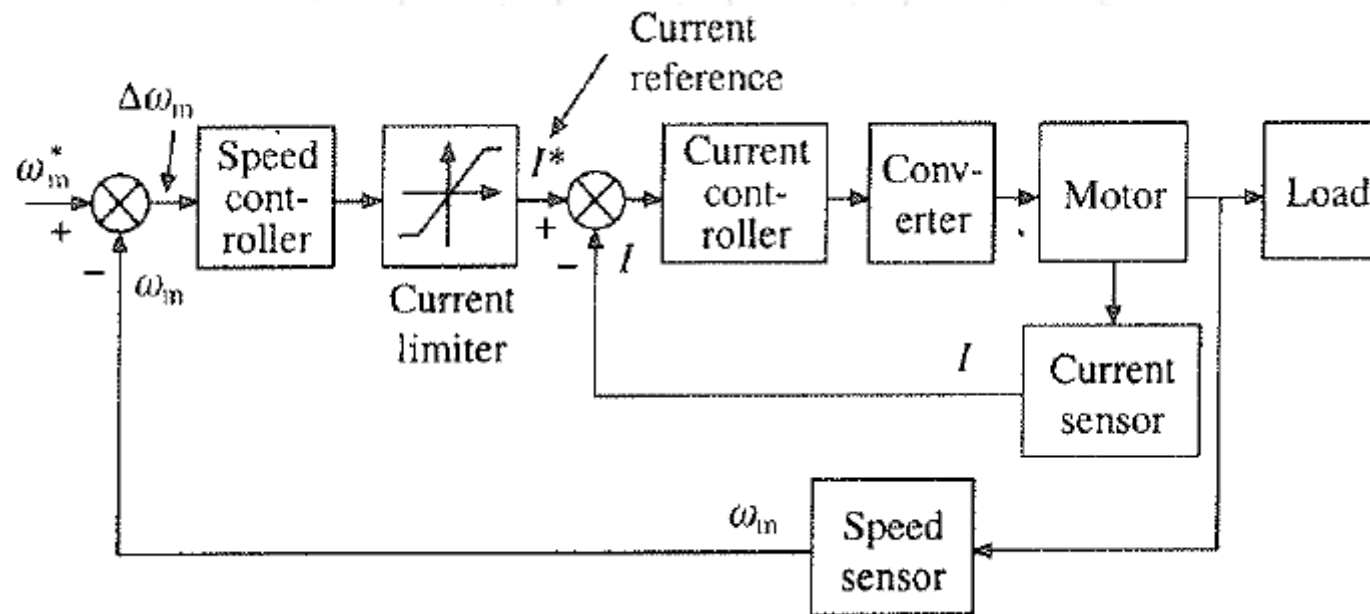
- ✓ شکل زیر نمونه ای از درایو موتور الکتریکی با کنترل حلقه بسته گشتاور را نشان می دهد که در کاربردهایی نظیر خودروهای برقی و هیبریدی کاربرد فراوان دارد.
- ✓ نوع موتور و کنترلر گشتاور نشان داده شده در شکل می تواند متنوع باشند. مثلا موتور DC و مبدل DC/DC.
- ✓ راننده خودرو با اعمال فشار مشخصی روی پدال گاز در واقع رفرنس گشتاور را تعیین می کند. کنترلر گشتاور نیز با مقایسه گشتاور واقعی و گشتاور رفرنس، از طریق مبدل به موتور ولتاژ و جریان مناسبی اعمال می کند.
- ✓ چون در خودرو، هدف نهایی از گاز دادن رسیدن به سرعت مطلوب برای خودرو است، تنظیم سرعت در چنین کاربردهایی بوسیله راننده خودرو صورت می گیرد که اینکار را با کم و زیاد کردن رفرنس گشتاور انجام می دهد.
- ✓ در واقع درایو از جنبه تنظیم سرعت حلقه باز است ولی از جنبه تنظیم گشتاور حلقه بسته است.



درایو با کنترل حلقه بسته گشتاور مورد استفاده در خودروهای برقی و هیبریدی

➤ درایوهای با کنترل حلقه بسته: مثالی از درایو با فیدبک سرعت

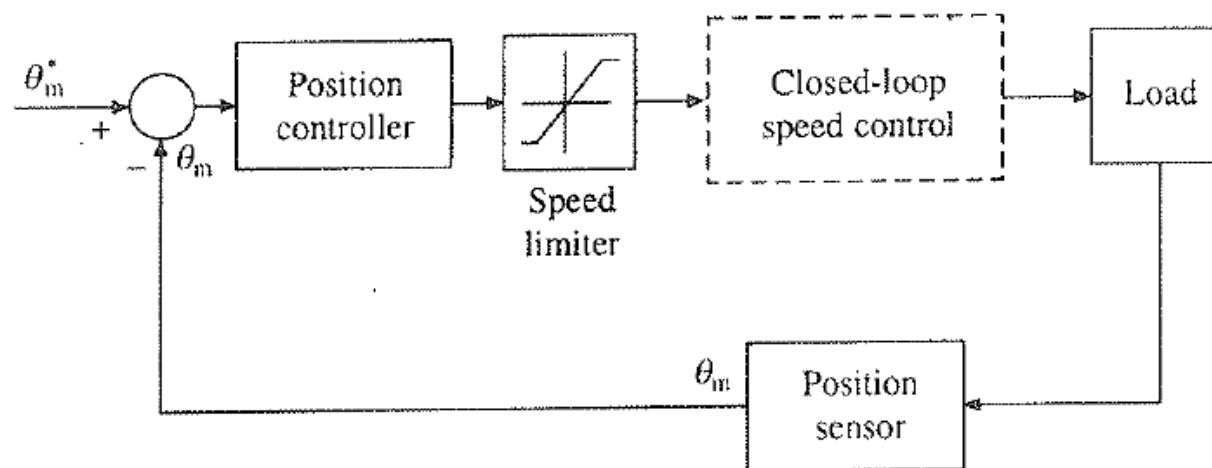
- ✓ در بسیار از کاربردهای درایوهای الکتریکی، تنظیم دستی سرعت موتور کار بسیار دشواری است و برای اتوماتیک کردن تنظیم سرعت از سیستم حلقه بسته سرعت گرفته می شود.
- ✓ برای این منظور از فیدبک سرعت در خارجی ترین حلقه کنترلی درایو استفاده می گردد.
- ✓ شکل زیر درایو حلقه بسته کنترل سرعت موتور القایی را نشان می دهد.
- ✓ به غیر از حلقه کنترل سرعت از یک حلقه داخلی کنترل جریان برای حفاظت جریان موتور و بهبود پاسخ دینامیکی استفاده می شود.



درایو با کنترل حلقه بسته سرعت موتور القایی

➤ درایوهای با کنترل حلقه بسته: مثالی از درایو با فیدبک موقعیت

- ✓ درایوهای با کنترل حلقه بسته موقعیت که بنام سروی موقعیت هم شناخته می شوند، در کاربردهای زیادی در صنعت بکار رفته می شوند.
- ✓ شکل زیر یک درایو کنترل حلقه بسته موقعیت را نشان می دهد که در آن خارجی ترین لوپ کنترلی مربوط به موقعیت زاویه ای محور است.
- ✓ در اغلب درایوهای کنترل موقعیت از یک سیستم حلقه بسته سرعت به عنوان سیستم داخلی (یا لوپ داخلی) استفاده می گردد.
- ✓ برای عملکرد دینامیکی بهتر، حتی سیستم حلقه بسته سرعت داخلی، می تواند شامل یک لوپ داخلی تر کنترل جریان باشد.
- ✓ تمامی لوپهای داخلی در درایوهای الکتریکی برای بهبود پاسخ دینامیکی و کاهش تاثیر منفی عواملی نظیر تغییرات گشتاور بار و اصطکاک، تغییر ولتاژ منبع تغذیه، کاهش تاثیر تغییرات پارامترهای موتور متاثر از دما و اشباع نظیر مقاومتها و اندوکتانسها می باشد.



درایو با کنترل حلقه بسته موقعیت



- ✓ اینکه از چه سنسور (حسگر) و یا سنسورهایی در درایوهای الکتریکی استفاده می شود، بسته به این دارد که از چه سیستم حلقه بسته و یا چه استراتژی کنترلی استفاده می گردد.
- ✓ منظور از سنسورها، آنهایی هستند که برای اهداف کنترلی استفاده می گردند. منظور ما سنسورهایی که برای کارهای صرفاً مانیتورینگ و یا حفاظتی (مثل سنسور دما) نیستند.

❖ انواع سنسور مورد استفاده در درایوهای الکتریکی

- ۱- سنسور جریان
- ۲- سنسور ولتاژ
- ۳- سنسور شار
- ۴- سنسور سرعت
- ۵- سنسور موقعیت
- ۶- سنسور گشتاور

✓ در ادامه بطور مختصر به توضیح انواع هر یک از سنسورهای فوق پرداخته می شود.



✓ سنسور جریان تقریباً کلیدی ترین سنسور در کل درایوهای الکتریکی است و تقریباً در تمام درایوها مورد استفاده قرار می گیرد.

❖ دلایل استفاده از سنسور جریان

- ۱- حفاظت موتور (فعال نمودن حفاظت Over Current در درایوهای الکتریکی)
- ۲- کنترل حد جریان
- ۳- حلقه کنترل داخلی جهت بهبود پاسخ دینامیکی
- ۴- جهت تخمین مقادیر کمیت‌هایی نظیر سرعت، شار و گشتاور

❖ تکنیک‌های مختلف بکار رفته در سنسورهای جریان

- ۱- اندازه گیری جریان با استفاده از ترانس جریان (CT)
- ۲- اندازه گیری با استفاده از مقاومت (شنت، مقاومت سری یا IC های خاص)
- ۳- اندازه گیری جریان بر مبنای پدیده اثر هال (Hall Effect)

✓ در این روش با استفاده از اثر القای الکترومغناطیسی، مجموع جریان فازها اندازه گیری می شود.

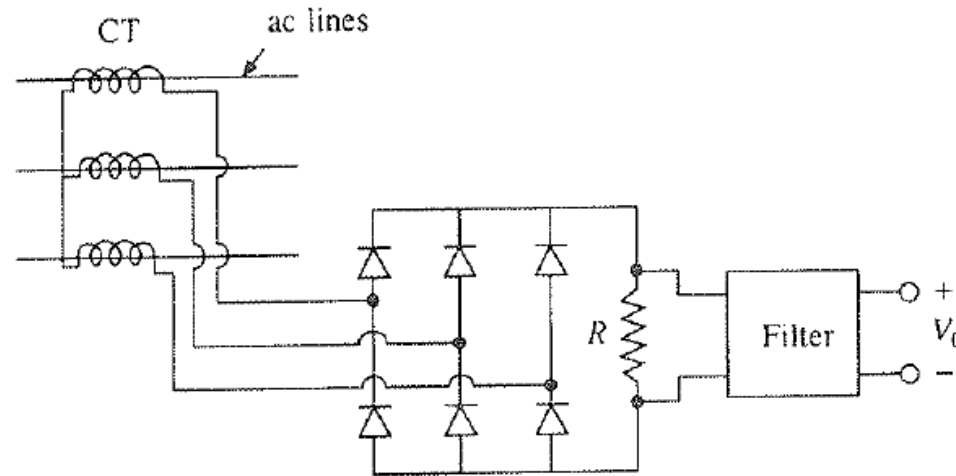


Fig. 3.10 Sensing of current in three-phase ac lines

❖ ویژگی های این روش اندازه گیری جریان:

- ۱- در هنگام اندازه گیری جریان خروجی اینورتر، هارمونیکهای مرتبه پائین ممکن است سبب اشباع هسته CT شوند.
- ۲- اندازه گیری جریان یک فاز در روش فوق امکانپذیر نیست.
- ۳- وزن و حجم این حسگر بالاست.
- ۴- مزیت ایزولاسیون بین مدار اندازه گیری و قدرت در این روش وجود دارد.



□ سنسورها در درایوهای الکتریکی

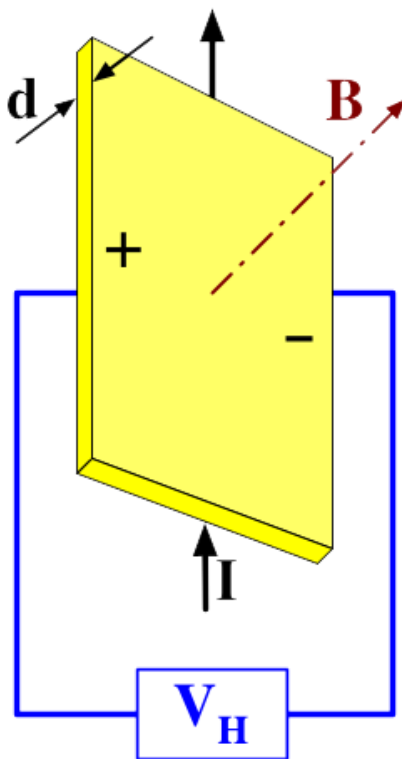
➤ سنسور جریان: با استفاده از مقاومت

- ✓ در این روش یک مقاومت با اهم کوچک و توان بالا و با خاصیت سلفی بسیار ناچیز در هر فاز موتور قرار می گیرد.
- ✓ با اندازه گیری افت ولتاژهای ایجاد شده در دو سر آنها، جریان های گذرنده از فازهای موتور بدست می آید.
- ✓ برای حفاظت از مدار کنترلی در برابر ولتاژ بالای بخش قدرت سیگنال خروجی اندازه گیری باید پس از ایزوله شدن توسط مدارات ایزولاسیون نظیر اپتوکوپلرها به مدار کنترل وارد شود.

❖ ویژگی های این روش اندازه گیری جریان:

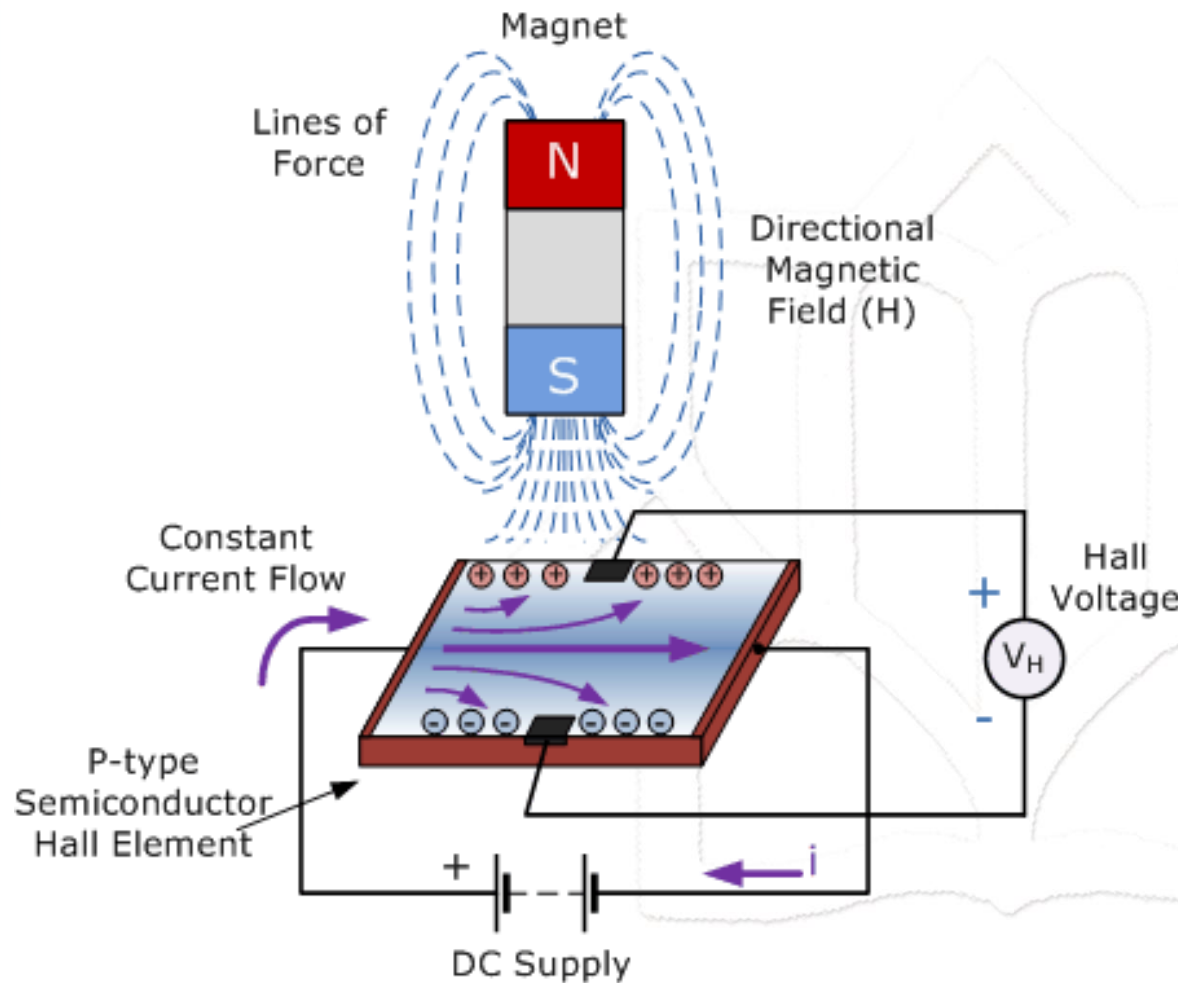
- ۱- نیازمند مدار ایزولاسیون جداگانه
- ۲- قیمت پائین
- ۳- اندازه و حجم کم که قابلیت مونتاژ روی برد است.
- ۴- انحراف مقدار مقاومت بواسطه حرارت ایجاد شده در آن
- ۵- دقت نامطلوب برای کارهای کنترلی حلقه بسته دقیق

- ✓ پدیده یا اثر هال در سال ۱۸۷۹ به وسیله ادوین هربرت هال در حالی که داشت روی رساله دکترای خود در دانشگاه جان هاپکینز در آمریکا کار می کرد، کشف گردید.
 - ✓ اثر هال نتیجه طبیعت جریان عبوری از یک هادی است که می توان آنرا اینگونه معرفی نمود: وقتی یک هادی حامل جریان الکتریکی در میدان مغناطیسی قرار می گیرد، ولتاژی عمود بر جریان و میدان مغناطیسی ایجاد می شود.
 - ✓ اثر هال در مواد نیمه هادی هم وجود دارد. با این وجود ماده ای استفاده می شود که بیشترین ولتاژ را ایجاد نماید.
 - ✓ برای یک فلز ساده که تنها یک نوع حامل بار (الکترون ها) در آن وجود دارد، ولتاژ هال (V_H)، به صورت زیر بدست می آید:
- $$V_H = \frac{-IB}{dne}$$
- ✓ که در آن I جریان عبوری از طول صفحه، B چگالی شار مغناطیسی، d عمق صفحه، e بار الکتریکی الکترون و n چگالی حامل های بار الکتریکی است.



❖ ویژگی های سنسورهای اثر هال

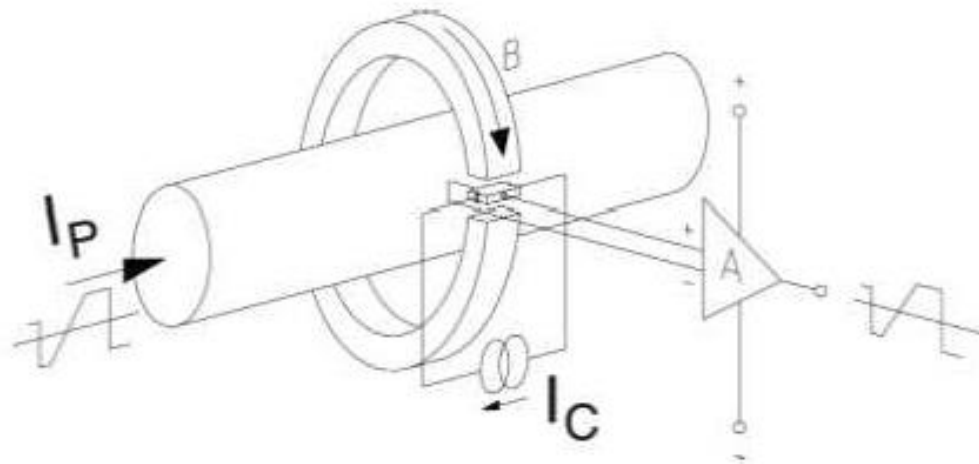
- ۱- ایزولاسیون عالی مدار قدرت از مدار کنترل
- ۲- خطی بودن در بازه وسیع
- ۳- پهنای باند زیاد از DC تا ۱۵۰ kHz
- ۴- دقت و حساسیت بالا
- ۵- خطای دریافت حرارتی پایین
- ۶- پاسخ زمانی سریع



❖ کاربردهای سنسورهای اثر هال

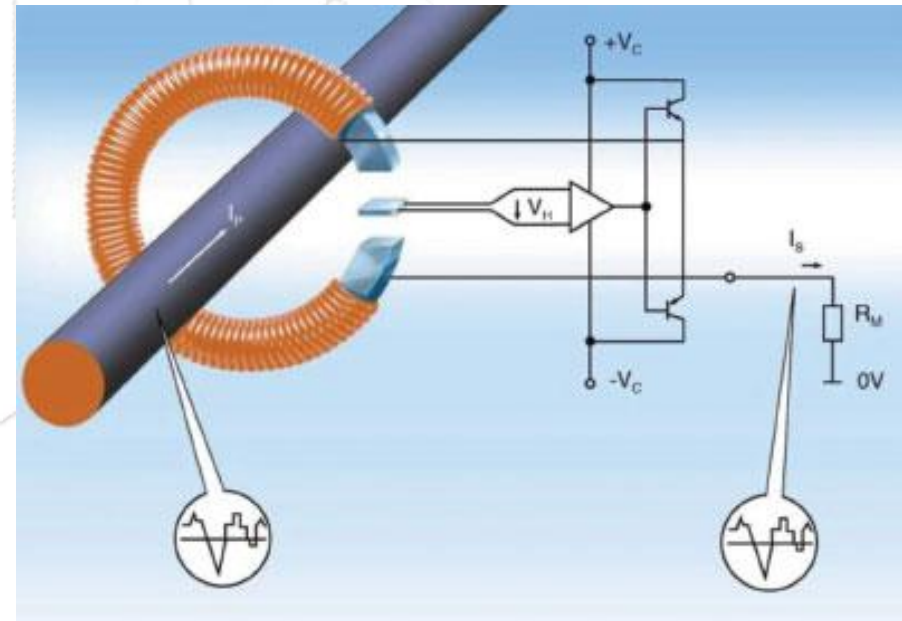
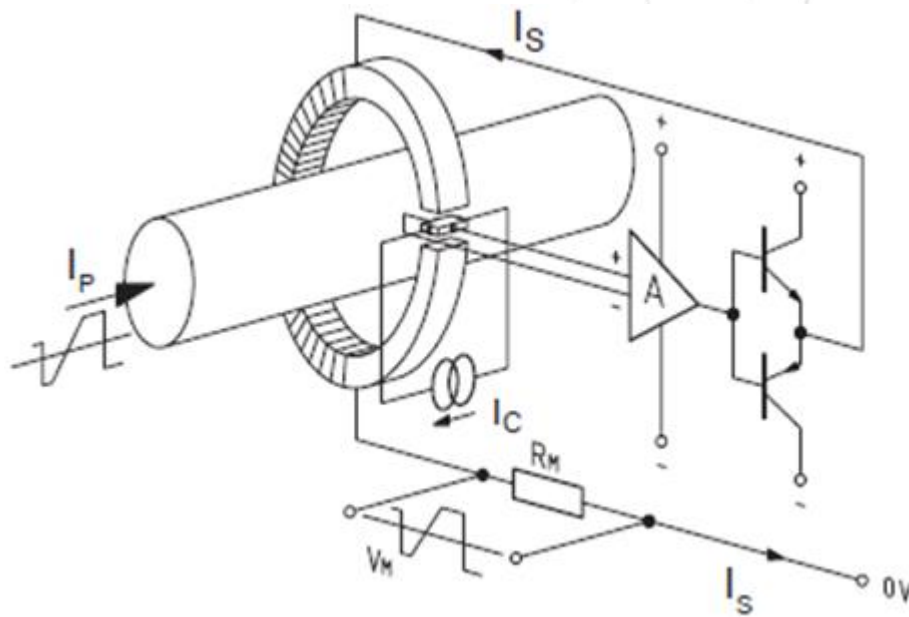
- ۱- کاربردهای حسگر با خروجی دیجیتال: نظیر اندازه گیری دور در موتورها، رله ها و ...
- ۲- کاربردهای با خروجی خطی: نظیر اندازه گیری جریان، ولتاژ، شار، ...

- ✓ در کاربردهای با خروجی خطی، سنسورهای اثر هال از دو طرح حلقه باز و حلقه بسته می توان استفاده نمود.
- ✓ در طرح حلقه باز، عبور جریان از مرکز هسته آهنی سبب القای شار در هسته شده که این شار عمود بر قطعه اثر هال واقع است. به دلیل پدیده اثر هال ولتاژی در دو سر دیگر این قطعه ایجاد می گردد که پس از تقویت به عنوان سیگنال خروجی سنسور از آن استفاده می گردد.
- ✓ دامنه ولتاژ اندازه گیری متناسب با چگالی شار هسته و در نتیجه متناسب با جریان I_p است.



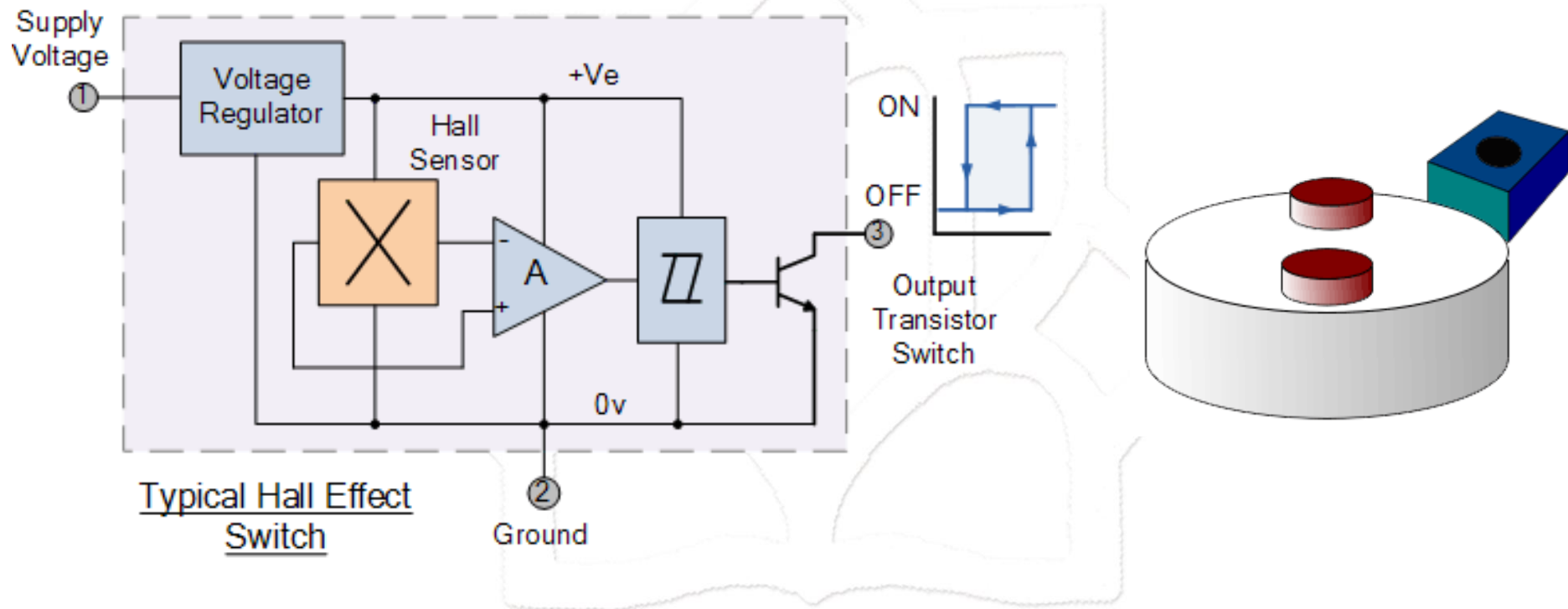
(الف) طرح حلقه باز اندازه گیری جریان در مبدل اثر هال

- ✓ در طرح حلقه بسته سنسورهای اثر هال نیز از یک سیم پیچ بر روی هسته مغناطیسی استفاده می شود تا میدانی هم اندازه میدان ناشی از جریان ورودی ولی مخالف جهت اولیه ایجاد شود.
- ✓ مدار المان هال و تقویت کننده آن به شکلی است که میدان مغناطیسی داخل هسته همیشه در حد صفر می باشد. با افزایش جریان ورودی، میدان مغناطیسی ایجاد می شود که این میدان بر روی المان هال اثر گذاشته و باعث ایجاد ولتاژ خروجی در المان هال می گردد، ولتاژ المان هال تقویت شده و به سیم پیچ جریانی را می فرستد که میدان ناشی از این جریان میدان مغناطیسی اولیه را متعادل کرده و به حد صفر می رساند.



(ب) طرح حلقه بسته اندازه گیری جریان در مبدل اثر هال

✓ در کاربردهای با خروجی دیجیتال، از مدارات اشmitt ترینگر در خروجی آشکارساز ولتاژ استفاده می گردد.



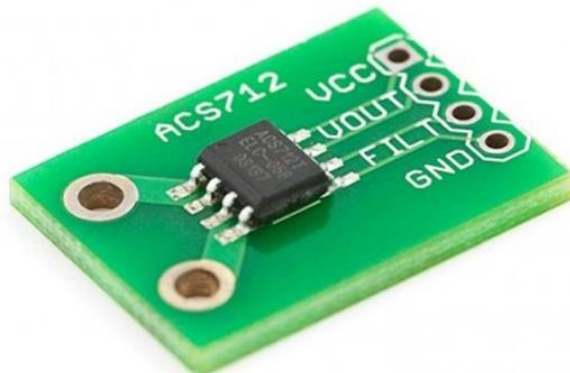
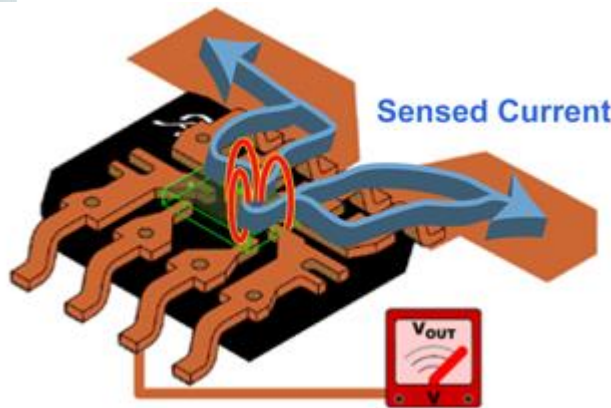
✓ از طرح فوق در بسیاری از سوئیچ ها و رله های کنترلی و حفاظتی در ابزار دقیق، صنایع خودروسازی و صنایع نفت و گاز استفاده می گردد.

✓ آی سی های سری ACS712 سنسور جریان اثر هال و از محصولات شرکت Allegro هستند. از این سنسورها میتوان برای اندازه گیری جریان های AC و DC در صنعت، خودرو و سیستمهای ارتباطی و دیگر تجهیزات الکترونیک قدرت استفاده کرد. طراحی این قطعه بصورت SMD است.

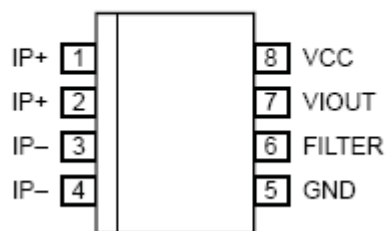
✓ نحوه عملکرد بدین صورت می باشد که جریان از پایه مورد نظر آن عبور می کند و این آی سی مانند آمپر متر به صورت سری در مسیر جریان عبوری قرار می گیرد و از خروجی ولتاژ به دست آمده از سنسور می توان مقدار جریان عبوری را بدست آورد.

❖ ویژگی های آی سی ACS712:

- (1) دارا بودن فیلتر یا نویز گیر داخلی
- (2) حداکثر تاخیر ۵ میکرو ثانیه از زمان ورود جریان به مدار تا قرار گرفتن در خروجی
- (3) حداکثر خطا خروجی در دمای ۲۵ درجه ۱.۵ درصد می باشد.
- (4) اندازه کوچک ۷*۱.۵*۲ و نصب SMD
- (5) پهنای باند ۸۰ kHz
- (6) ولتاژ کاری ۵ ولت
- (7) حساسیت ولتاژ خروجی بین ۶۶ تا ۱۸۵ میلی ولت بر آمپر
- (8) عدم هیستریزیس مغناطیسی ، حدود صفر



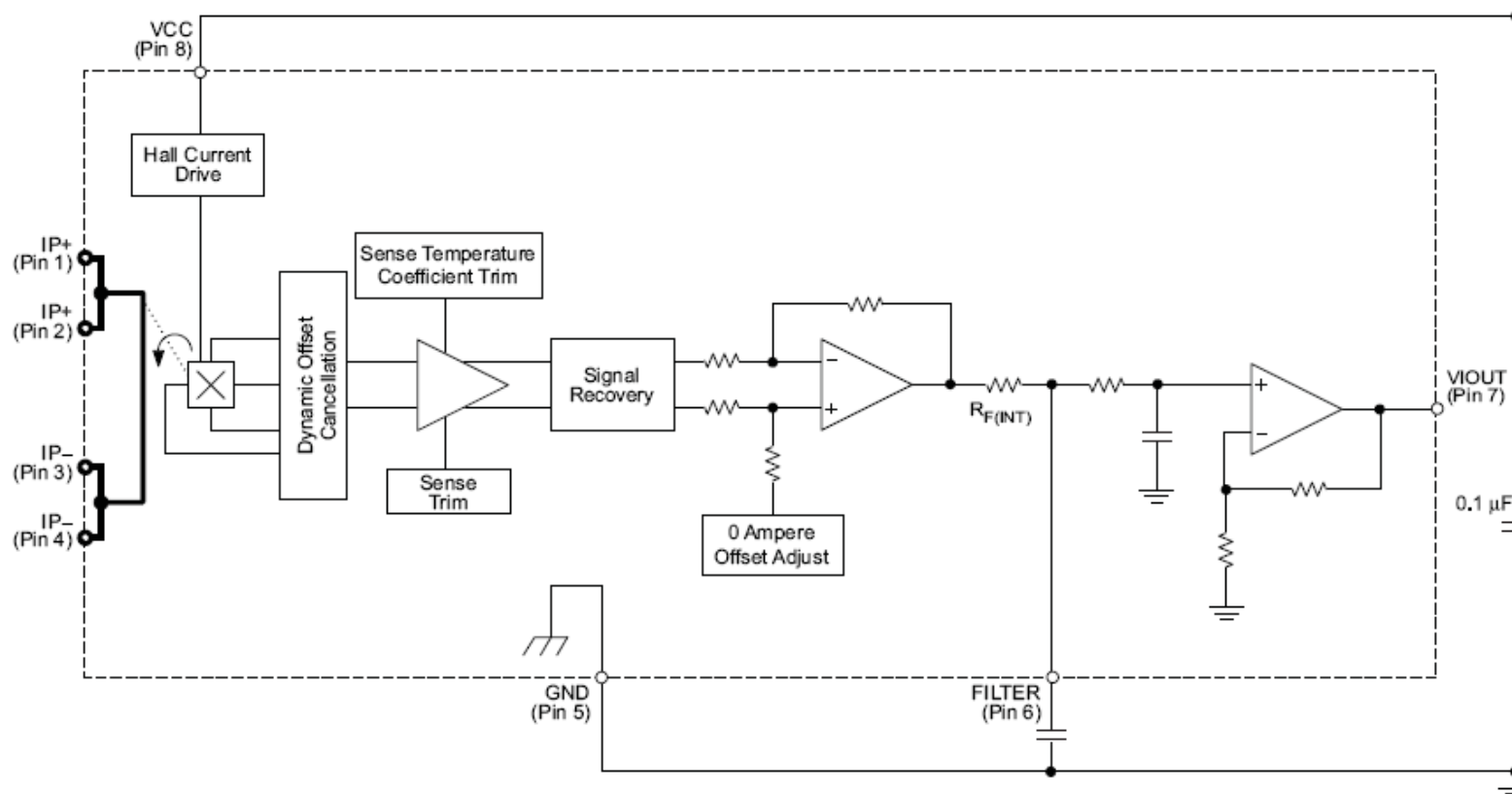
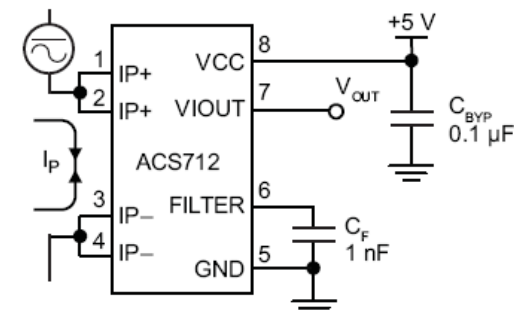
Pin-out Diagram



Terminal List Table

Number	Name	Description
1 and 2	IP+	Terminals for current being sampled; fused internally
3 and 4	IP-	Terminals for current being sampled; fused internally
5	GND	Signal ground terminal
6	FILTER	Terminal for external capacitor that sets bandwidth
7	VIOU	Analog output signal
8	VCC	Device power supply terminal

Typical Application



Functional Block Diagram

❖ ویژگی های این IC:

- (1) ایمنی بالا در برابر نویز محیط های صنعتی
- (2) استفاده از تکنیک شیلد مجتمع برای کاهش کوپلینگ خازنی از هادی جریان روی نیمه هادی
- (3) دقت بالا و خطای کم با استفاده از جبران سازی حرارتی بهره و آفست
- (4) ابعاد کوچک با مونتاژ و نصب آسان
- (5) دارای آی سی اثر هال یکپارچه برای دقت بالا
- (6) تلفات توان فوق العاده پایین: مقاوت ۱۰۰ میکرو اهم در مسیر هادی جریان
- (7) ایزولاسیون گالوانیک برای کاربردهایی با جریان و ولتاژ بالا
- (8) قابلیت راه اندازی با ولتاژ تغذیه ۳.۰ تا ۵.۵ ولت
- (9) پهنای باند در حدود ۲۰ کیلوهرتز
- (10) زمان پاسخگویی ۳ میکرو ثانیه به جریانهای لحظه ای
- (11) خروجی ولتاژ متناسب با جریانهای AC و DC
- (12) دقت کالیبره شده توسط شرکت سازنده
- (13) آفست ولتاژ پایدار
- (14) هیستریزیس مغناطیسی نزدیک به صفر

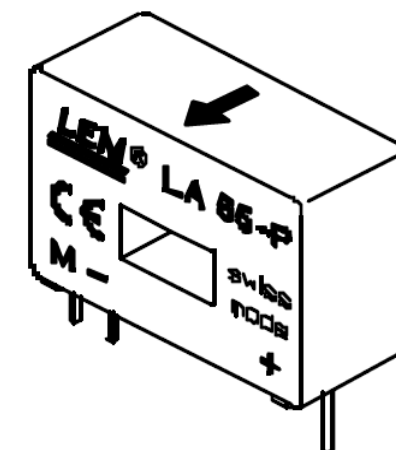
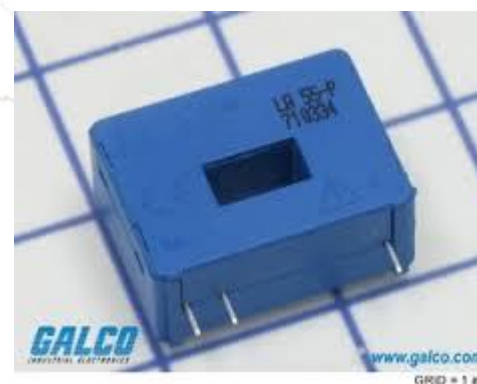


سنسور جریان اثر هال: سنسورهای شرکت LEM

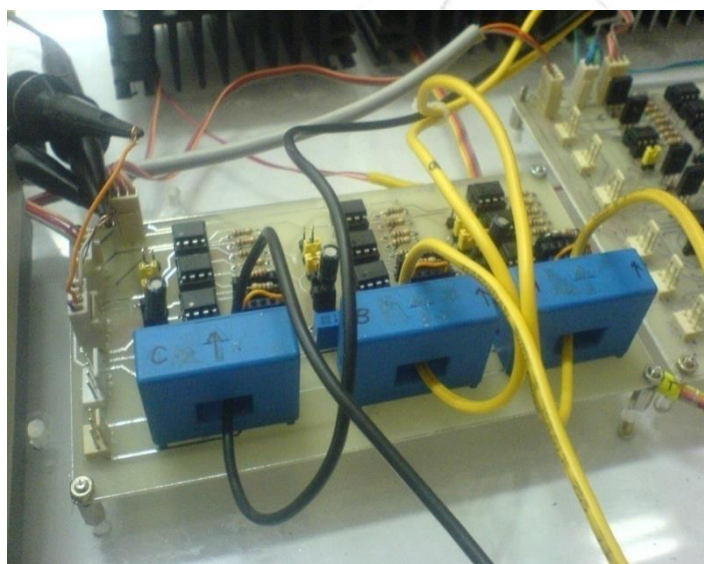
✓ شرکت سوئیسی LEM نیز طیف متنوعی از سنسورهای جریان اثر هال معرفی نموده است.

Electrical data

I_{PN}	Primary nominal r.m.s. current	50	A
I_P	Primary current, measuring range	0 .. ± 100	A
R_M	Measuring resistance @	$T_A = 70^\circ\text{C}$ $T_A = 85^\circ\text{C}$ $R_{M \min}$ $R_{M \max}$ $R_{M \min}$ $R_{M \max}$	
	with $\pm 12\text{ V}$	@ $\pm 50\text{ A}$ max	0 215 0 210 Ω
		@ $\pm 100\text{ A}$ max	0 35 0 30 Ω
	with $\pm 15\text{ V}$	@ $\pm 50\text{ A}$ max	0 335 30 330 Ω
		@ $\pm 100\text{ A}$ max	0 95 30 90 Ω
I_{SN}	Secondary nominal r.m.s. current	25	mA
K_N	Conversion ratio	1 : 2000	
V_C	Supply voltage ($\pm 5\%$)	$\pm 12 \dots 15$	V
I_C	Current consumption	$10(@\pm 15\text{V}) + I_S$	mA
V_d	R.m.s. voltage for AC isolation test, 50 Hz, 1 mn	2.5	kV

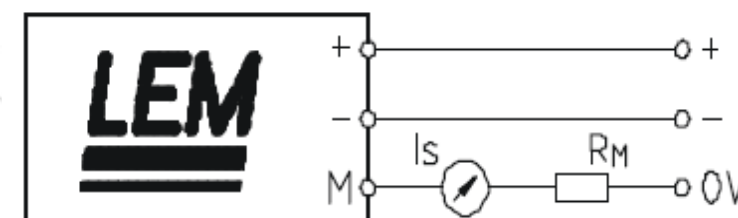


(الف) سنسور جریان اثر هال مدل LA 55-P



(ج) استفاده از سه سنسور جریان اثر هال در مدار واقعی برای

اندازه گیری جریان سه فاز موتور



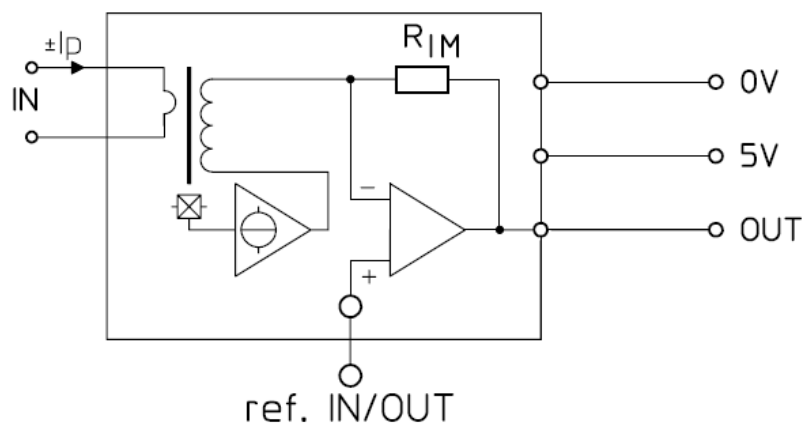
(ب) اتصالات سنسور جریان اثر هال

Current Transducer LTSR 6-NP

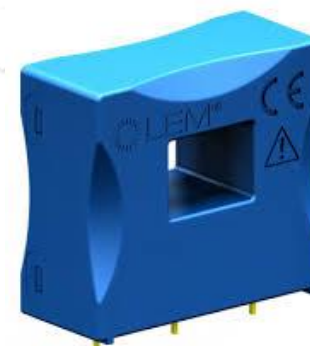
Electrical data

I_{PN}	Primary nominal current rms	6	At
I_{PFM}	Primary current, measuring range	$0 \dots \pm 19.2^{1)}$	At
I_P	Overload capability	250	At
V_{OUT}	Output voltage (Analog) @ I_P $I_P = 0$	$2.5 \pm (0.625 \cdot I_P / I_{PN})$ $2.5^{2)}$	V V
V_{REF}	Reference voltage (internal reference), Ref _{OUT} mode	$2.5^{3)}$	V
	Reference voltage (external reference), Ref _{IN} mode	$1.9 \dots 2.7^{4)}$	V
G	Sensitivity	104.16	mV/A
N_S	Number of secondary turns ($\pm 0.1 \%$)	2000	
R_L	Load resistance	≥ 2	k Ω
C_{Lmax}	Maximum capacitive loading	500	pF
R_{IM}	Internal measuring resistance ($\pm 0.5 \%$)	208.33	Ω
TCR_{IM}	Temperature coefficient of R_{IM}	< 50	ppm/K
V_C	Supply voltage ($\pm 5 \%$)	5	V
I_C	Current consumption @ $V_C = 5 \text{ V}$	Typ $28 + I_S^{5)} + (V_{OUT} R_L)$	mA

Operation principle



✓ نمونه دیگری از سنسورهای LEM:





✓ سنسور ولتاژ نیز یکی از سنسورهای پایه در درایوهای الکتریکی است.

❖ دلایل استفاده از سنسور ولتاژ:

- ۱- حفاظت موتور (فعال نمودن حفاظت Over Voltage باس دی سی در درایوهای الکتریکی)
- ۲- حلقه کنترل داخلی ولتاژ جهت بهبود پاسخ دینامیکی
- ۳- جهت تخمین مقادیر کمیت‌هایی نظیر سرعت، شار و گشتاور

❖ تکنیک‌های مختلف بکار رفته در سنسورهای ولتاژ:

- ۱- اندازه‌گیری ولتاژ با استفاده مقسم مقاومتی
- ۲- اندازه‌گیری ولتاژ بر مبنای پدیده اثر هال (Hall Effect)



✓ در این روش از ولتاژ محل مورد اندازه گیری به مقسم ولتاژ اتصال داده شده و برحسب ولتاژ مورد نیاز در مدار اندازه گیری، مقادیر مقاومتها تعیین می شوند.

❖ ویژگی های این روش اندازه گیری ولتاژ:

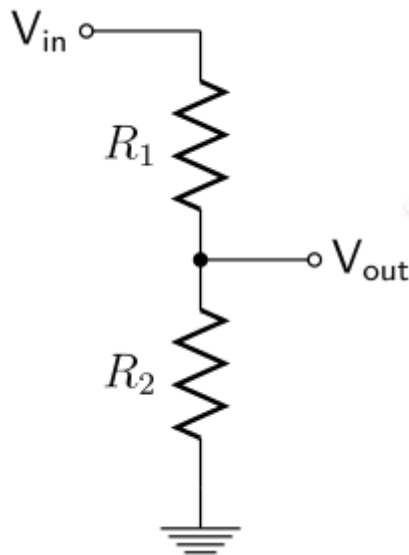
۱- نیازمند مدار ایزولاسیون جداگانه

۲- قیمت پائین

۳- دقت مناسب

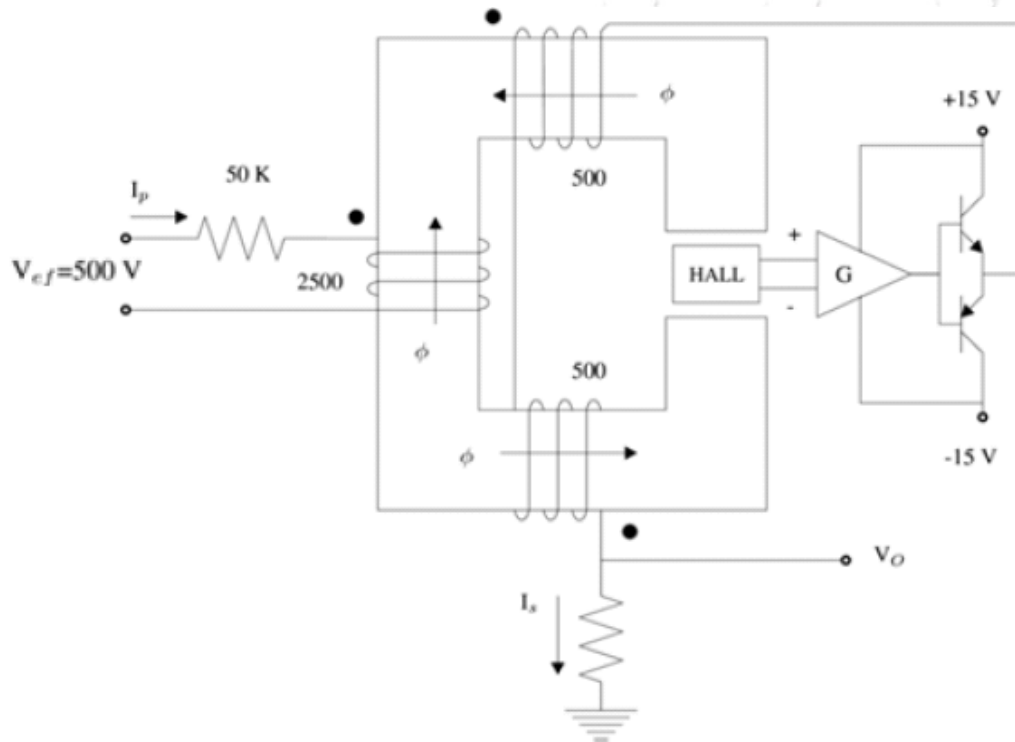
۴- خطای اندازه گیری ناشی از تغییرات مقاومتها بعلت افزایش دما

۵- اثر بارگذاری طبقات بعدی



- ✓ در این روش از پدیده اثر هال برای اندازه گیری ولتاژ (همانند جریان) استفاده می شود.
- ✓ این نوع سنسور تمام مزایای سنسورهای اثر هال نظیر ایزولاسیون، خطی بودن، دقت بالا و ... را داراست.

✓ عملکرد سنسورهای ولتاژ نیز مانند سنسورهای جریان اثر هال حلقه بسته میباشد با این اختلاف که در سنسورهای جریان ورودی از طریق هادی عبوری از درون سنسور به هسته اعمال می شود ولی در سنسور ولتاژ، ورودی از طریق یک سیم پیچ که بر روی سیم پیچ هسته مغناطیسی پیچیده شده است اعمال میگردد، بنابر این در حقیقت سنسور ولتاژ همان سنسور جریان است که ورودی آن بجای یک دور هادی، N دور سیم دارد و می تواند از ولتاژ ورودی نمونه برداری کرده و آنرا مانند سنسور جریان به مقادیر خروجی تبدیل نماید، جریان نمونه برداری شده از ولتاژ ورودی بسیار کم و در حد چند میلی آمپر میباشد، این جریان پس از عبور از بوبین، در عدد N (تعداد دور بوبین) ضرب شده و عدد قابل توجهی می شود و پس از آن مانند یک سنسور جریان عمل می کند. برای تبدیل ولتاژ به جریان می توان از مقاومت های خارج از سنسور استفاده کرد و یا از شبکه مقاومتی داخل سنسور استفاده کرده و ولتاژ ورودی را مستقیماً به سنسور وصل نمود.



شماتیک داخلی سنسور ولتاژ اثر هال

سنسور ولتاژ: سنسور ولتاژ اثر هال LV-25 شرکت LEM

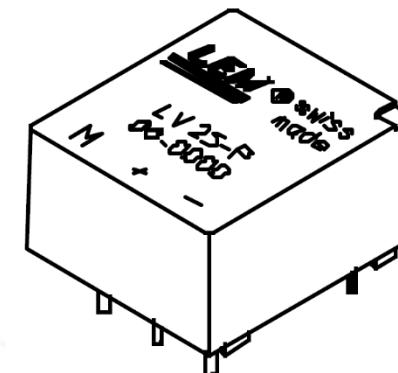
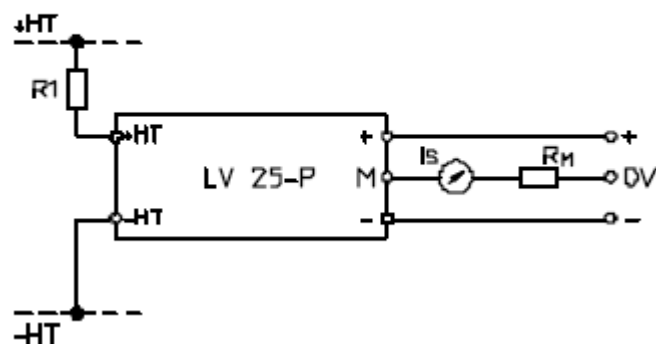
✓ در ادامه نمونه ای از سنسور ولتاژ اثر هال شرکت LEM معرفی می شود.

Voltage Transducer LV 25-P

Electrical data

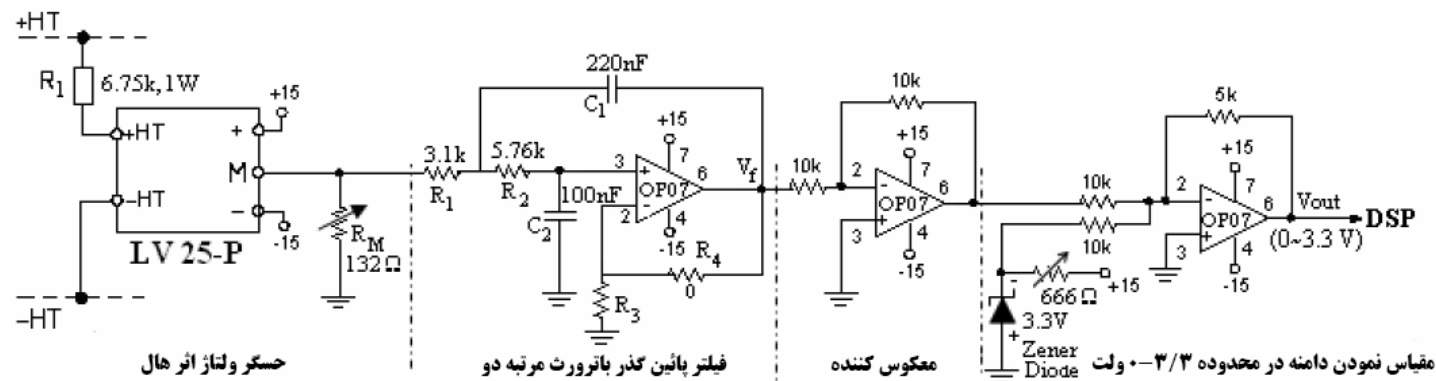
I_{PN}	Primary nominal r.m.s. current	10	mA
I_P	Primary current, measuring range	$0 \dots \pm 14$	mA
R_M	Measuring resistance	R_{Mmin} R_{Mmax}	
	with ± 12 V	@ ± 10 mA _{max}	30 190 Ω
		@ ± 14 mA _{max}	30 100 Ω
	with ± 15 V	@ ± 10 mA _{max}	100 350 Ω
		@ ± 14 mA _{max}	100 190 Ω
I_{SN}	Secondary nominal r.m.s. current	25	mA
K_N	Conversion ratio	2500 : 1000	
V_C	Supply voltage ($\pm 5\%$)	$\pm 12 \dots 15$	V
I_C	Current consumption	$10 (@ \pm 15 V) + I_S$	mA
V_d	R.m.s. voltage for AC isolation test ¹⁾ , 50 Hz, 1 mn	2.5	kV

Connection

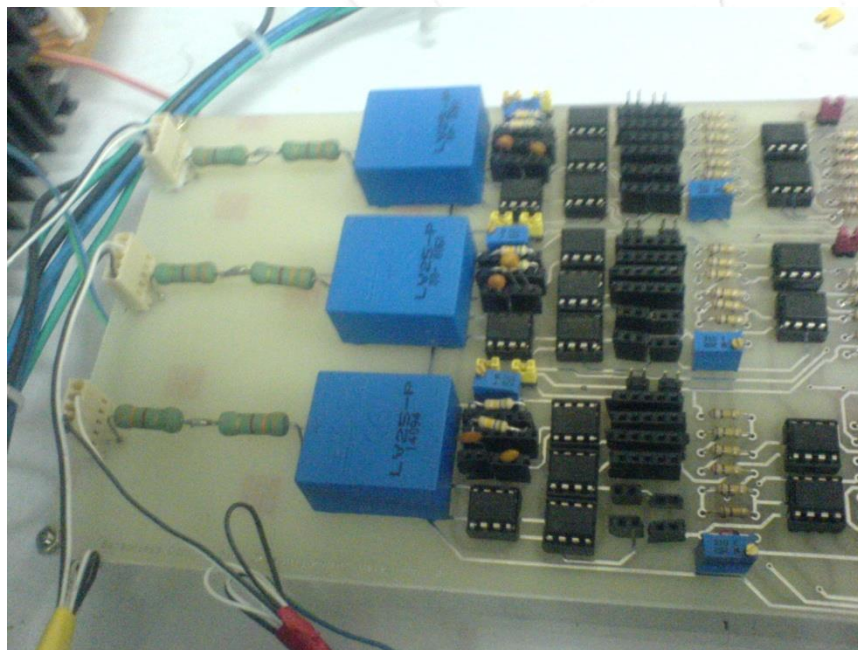


➤ سنسور ولتاژ: سنسور ولتاژ اثر هال LV-25 شرکت LEM

✓ برای تقویت، تطبیق سطح ولتاژ خروجی سنسور با ولتاژ مجاز ورودیهای سیستم کنترلر (مثل DSP)، حذف اثر بارگذاری و یا حذف نویزهای روی ولتاژ اندازه گیری شده، در خروجی سنسور ولتاژ مدارهای مناسبی باید طراحی شود.



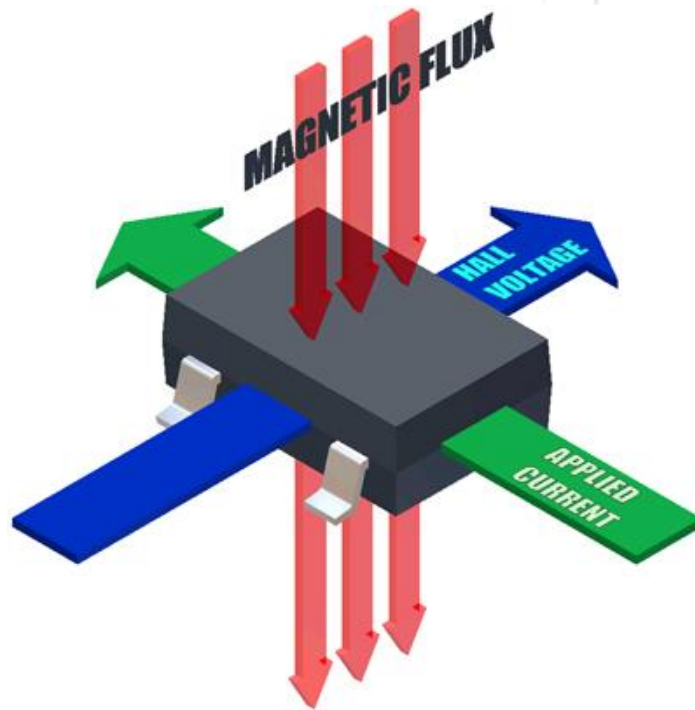
شکل (۵-۸): مدار حسگر ولتاژ



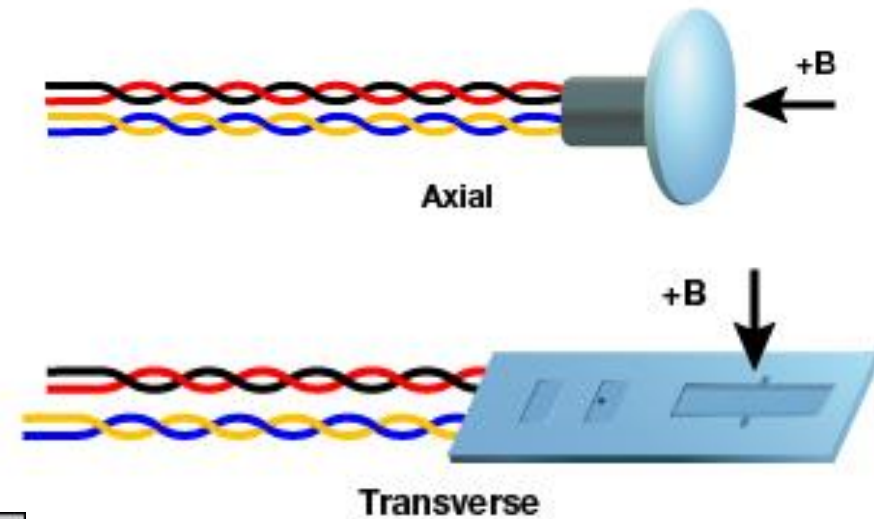
- ✓ برای اندازه گیری شار اغلب از پدیده اثر هال استفاده می شود.
- ✓ سنسور شار در درایوهای الکتریکی کمتر مورد استفاده قرار می گیرد و فقط در بعضی از روشهای کنترل پیشرفته نظیر کنترل برداری مستقیم بکار می رود.
- ✓ در هنگام استفاده از استراتژی های کنترلی که شامل حلقه کنترل شار هستند بجای اندازه گیری مستقیم شار، مقدار آنرا با استفاده از روابط مدل موتور تخمین می زنند.

❖ دلایل عدم بکارگیری سنسورهای شار:

- ۱- دشوار بودن جانمایی سنسور شار در مدار مغناطیسی موتور که معمولاً سنسور شار باید در فاصله هوایی قرار گیرد.
- ۲- حساس بودن سنسور شار به ارتعاش، گرما، غبار و ...
- ۳- پیچیده شدن مدارات سخت افزاری و ...



✓ اغلب سنسورهای شار اثر هال به دو صورت Axial و Transverse ساخته می شوند.

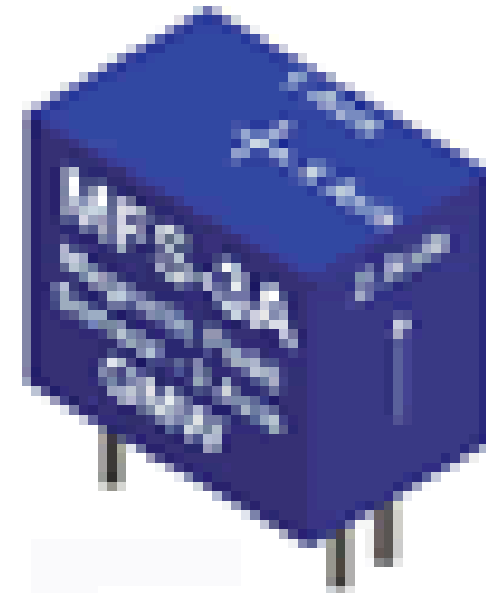
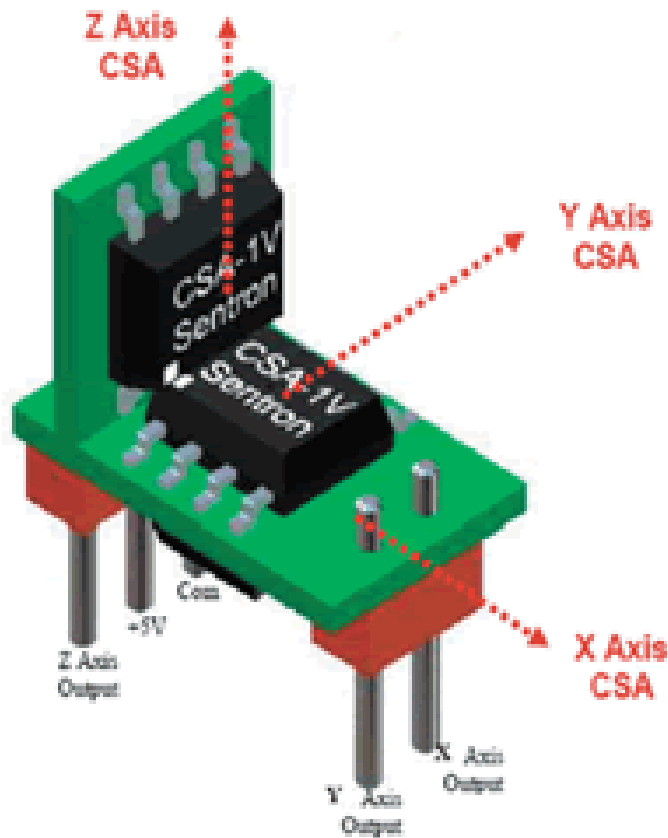


The Hall voltage can be given by the expression:

$$V_H = Y_B B \sin \phi$$

where V_H = Hall Voltage (mV)
 Y_B = Magnetic Sensitivity (mV per kG, at a fixed current)
 B = Magnetic field flux density (kG)
 ϕ = Angle between magnetic flux vector and the plane of Hall generator

- ✓ با توجه به آنکه حرکت شار در فضا در بعضی کاربردها بصورت سه بعدی است، برخی سازندگان سنسورهای شاری ساخته اند که مولفه های بردار شار در دو یا سه راستا را هم اندازه گیری می نمایند.
- ✓ البته این حسگرها برای کاربرد درایو الکتریکی مورد استفاده قرار نمی گیرند.





✓ سنسور سرعت نیز یکی از سنسورهای اصلی مورد استفاده در درایوهای الکتریکی است که معمولاً در اغلب سیستمهای کنترل حلقه بسته سرعت مورد استفاده قرار می گیرد.

❖ دلایل استفاده از سنسور سرعت:

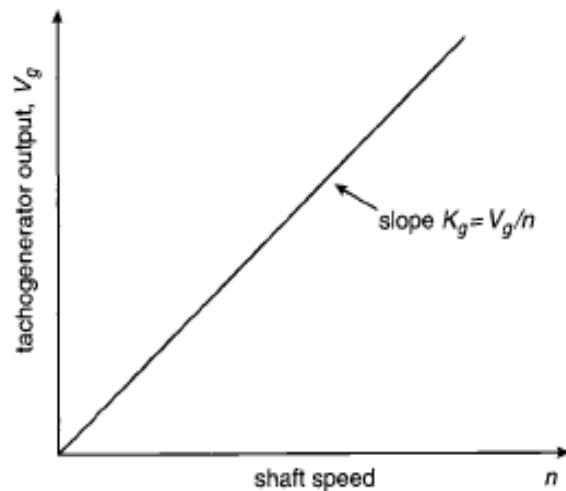
- ۱- کنترل دقیق سرعت موتور در شرایط مختلف حالت دائم و گذرا و در حضور تغییرات گشتاور در درایوهای کنترل حلقه بسته سرعت
- ۲- کنترل دقیق سرعت که در دایو کنترل حلقه بسته موقعیت به عنوان لوپ کنترل داخلی (میانی) مورد استفاده قرار می گیرد.

❖ انواع مختلف سنسورهای سرعت:

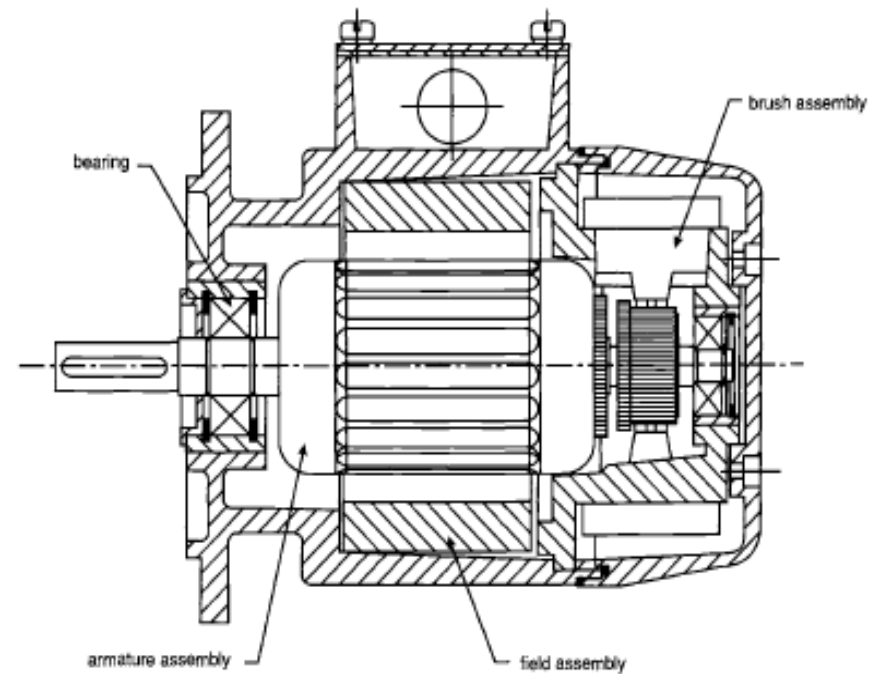
- ۱- تاکومترهای DC و AC
- ۲- شافت اینکودرهای نوری

✓ تاکومتر در واقع یک ژنراتور DC یا AC است.

✓ تاکومتر نوع DC به دلیل سادگی و عدم نیاز به مدارات مکمل، کاربرد بیشتری دارد.



(ب) رابطه ولتاژ و سرعت یک تاکومتر



(الف) شماتیک یک تاکومتر DC

ویژگیها: دقت بالا تا حد ۰/۱ درصد، کم اثر بودن نویز بر آنها، معمولاً با یک کوپلینگ انعطاف پذیر به محور موتور متصل می شوند.

HUBNER
BERLIN



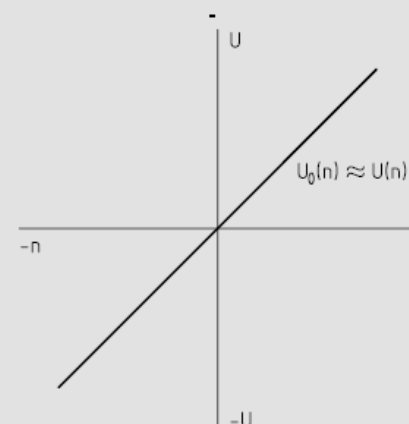
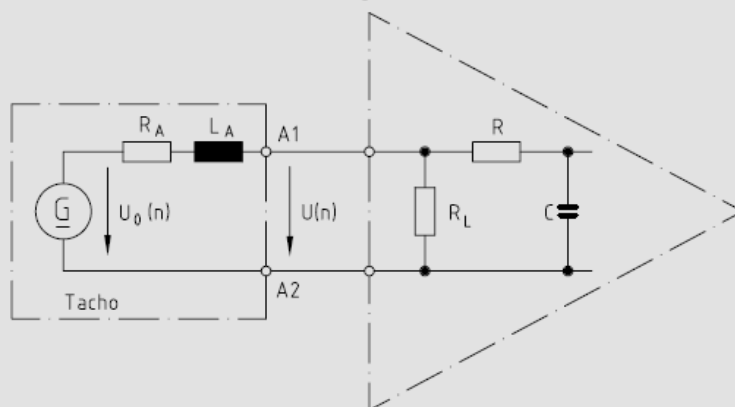
GT 5 • GTL 5
DC-Tachos
DC Tachogenerators



Bestellschlüssel / Ordering key

	Leerlaufspannung <i>No-load voltage</i>	Drehzahlbereich [min ⁻¹] <i>Speed range [rpm]</i>			max. Drehzahl <i>Maximum speed</i>	Anker-Widerstand <i>Armature resistance</i>	Anker-Induktivität <i>Armature inductance</i>
	<i>U₀</i> [mV/min ⁻¹]	0 - 3000	0 - 6000	0 - 10000			
Typ <i>Type</i>	<i>U₀</i> [mV/min ⁻¹]	<i>R_{Load}</i> [kΩ]	<i>R_{Load}</i> [kΩ]	<i>R_{Load}</i> [kΩ]	<i>n_{max}</i> [min ⁻¹]	<i>R_A</i> (20 °C) [Ω]	<i>L_A</i> [mH]
GT 5.05 L / 407	7	≥ 10	≥ 23	≥ 65	10000	240	45
GT 5.05 L / 409 (US-Version)	9,5	≥ 18	≥ 44	≥ 121	10000	410	80
GT 5.05 L / 410	10	≥ 20	≥ 48	≥ 133	10000	430	85

Anschlussbild / Circuit diagram



$$R > R_L \gg R_A \leadsto U(n) = U_0(n) \frac{R_L}{R_A + R_L} \approx U_0(n) \quad \tau_{RC} \approx R \cdot C \quad \tau_A \approx \frac{L_A}{R_L}$$

Polarität bei Rechtslauf des Antriebes, Blick auf A-Seite
Polarity for clockwise rotation of the drive, viewing mounting face

2A1 : +
2A2 : - (VDE)

❖ **اینکودر یا رمزکننده نوری:** به ازای یک دور چرخش محور آن تعداد زیادی پالس ایجاد می شود. این پالسها در کنترلر درایو پردازش شده (شمرده و یا دیکود شده) و از روی آن موقعیت و سرعت روتور محاسبه می گردد.

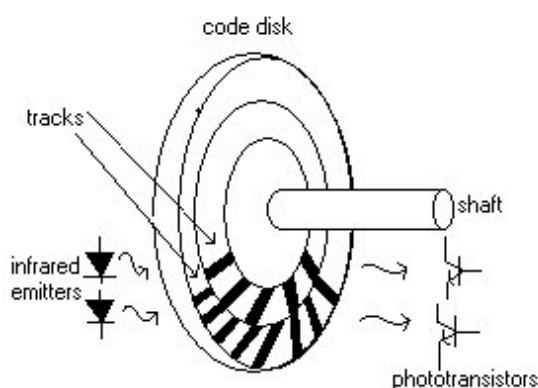


Fig 1. A rotary optical encoder

❖ ویژگیهای اینکودرها:

- ۱- دقت بسیار بالا
- ۲- قابلیت اطمینان زیاد و خطای کم
- ۳- پاسخ دینامیکی سریع و بدون تاخیر

❖ انواع اینکودرهای نوری از نظر سیگنال خروجی:

- ۱- اینکودرهای افزایشی (Incremental encoders)
- ۲- اینکودرهای مطلق (Absolute encoders)

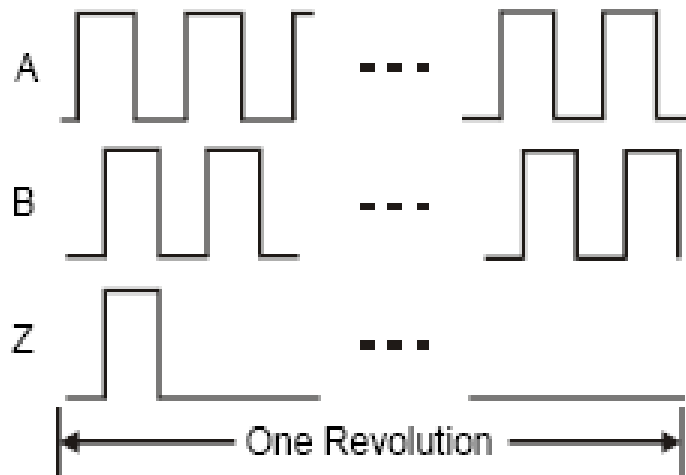


نمونه هایی از اینکودرهای نوری

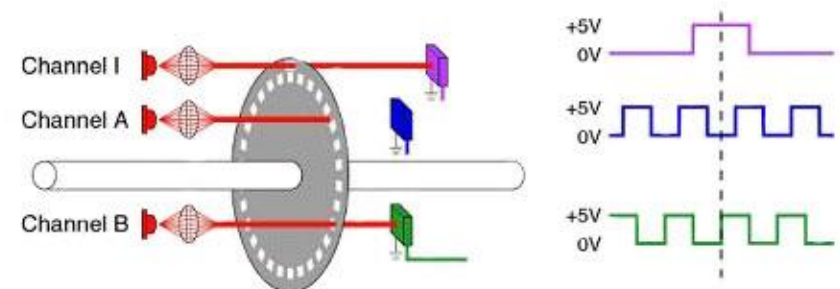
✓ **در اینکودرهای افزایشی:** به ازای یک دور چرخش محور آن یک، یا دو و یا سه سری قطار پالس ایجاد می شود. این پالسها در کنترلر درایو شمارش شده و از روی آن موقعیت و سرعت روتور محاسبه می گردد.

$$\text{Pulse Frequency (Hz)} = \frac{\text{Speed (rpm)} \times \text{Resolution (PPR)}}{60}$$

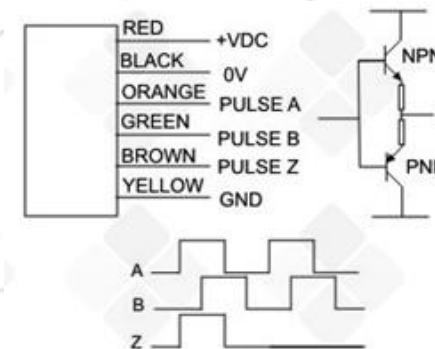
Channel



(ب) سیگنالهای خروجی یک اینکودر نوری افزایشی همراه سیگنال اندیس Z



(الف) شماتیک کلی یک اینکودر افزایشی دو کاناله

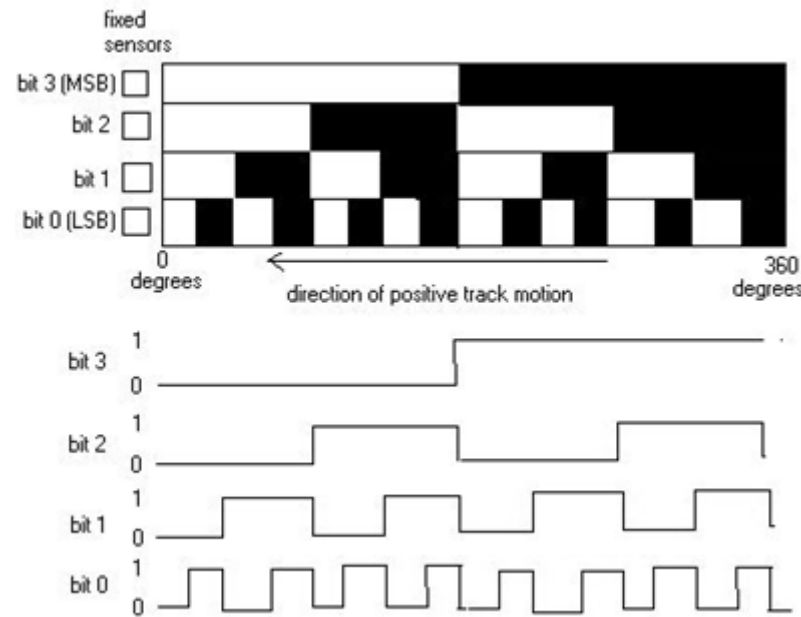


(ج) پین های خروجی اینکودر افزایشی دو کاناله

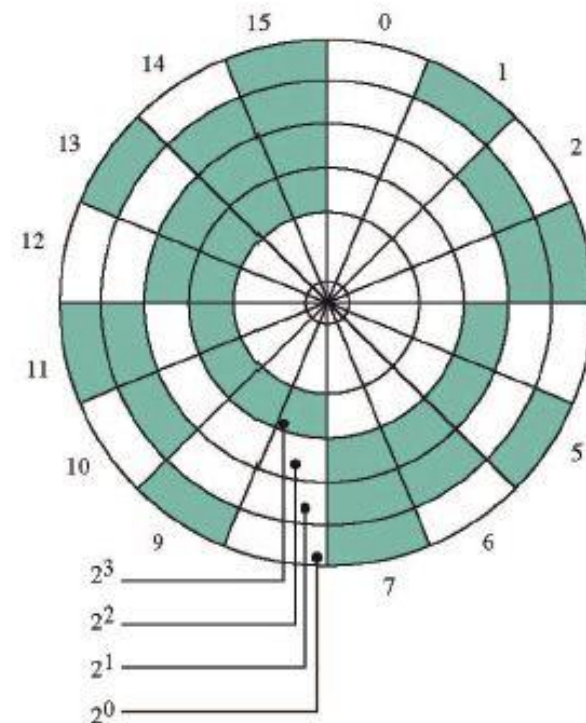
✓ از تعیین موقعیت قطار پالس A و B نسبت به یکدیگر جهت چرخش روتور بدست می آید.

✓ در اینکودرهای افزایشی، هرچقدر تعداد پالسهای خروجی در یک دور یا عدد PPR آن بزرگتر باشد، دقت اینکودر بیشتر است.

✓ **در اینکودرهای مطلق:** خروجی بصورت یک عدد ۳ بیتی به بالاست که بر حسب مقدار زاویه چرخش، مقدار عدد سه بیتی بزرگتر می شود. با داشتن زمان چرخش، سرعت محور قابل محاسبه است.



(ب) الگوی کدگذاری بصورت باینری در اینکودرهای مطلق ۴ بیتی

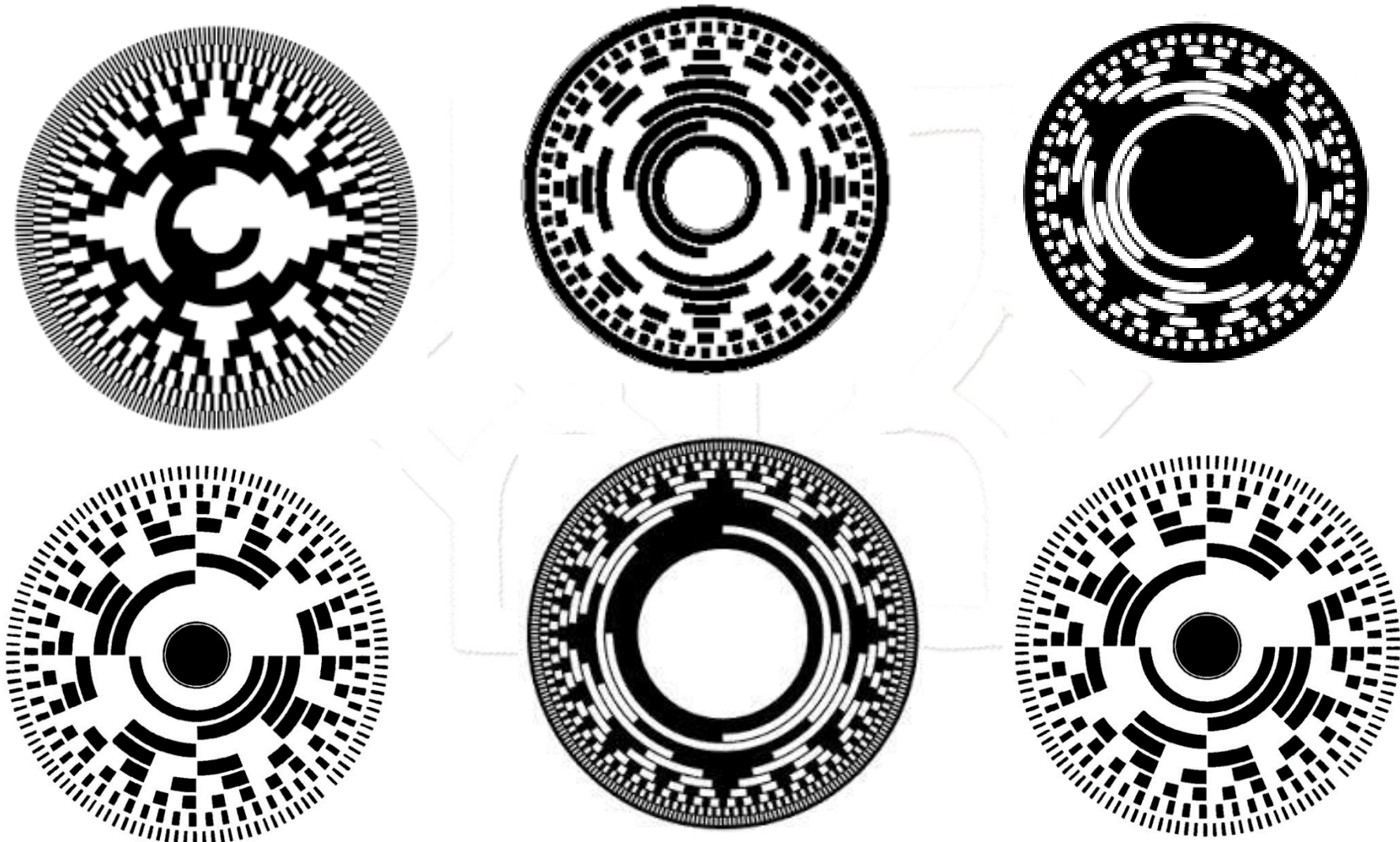


(الف) صفحه دورانی اینکودرهای باینری ۴ بیتی

✓ بیت‌های خروجی می توانند بصورت باینری و یا کد گری (Gray) کد شده باشند.

✓ در اینکودرهای مطلق، هرچقدر تعداد بیتها بیشتر باشد، دقت اینکودر بیشتر است.

✓ چند نوع الگوی کدگذاری دیگر در اینکودرهای مطلق و افزایشی در شکلهای زیر آورده شده اند.





✓ سنسور موقعیت نیز یکی از سنسورهای اصلی مورد استفاده در درایوهای الکتریکی است که در سیستمهای کنترل حلقه بسته سرعت و موقعیت مورد استفاده قرار می گیرد.

❖ دلایل استفاده از سنسور موقعیت:

- ۱- کنترل دقیق موقعیت روتور در سیستمهای کنترل حلقه بسته موقعیت (سروهای وضعیت)
- ۲- در سیستمهای کنترل حلقه بسته سرعت و هنگام بکارگیری استراتژی های پیشرفته کنترل برداری و استفاده در تبدیلات پارک

❖ انواع مختلف سنسورهای موقعیت:

- ۱- شافت اینکودرهای نوری
- ۲- رزولورها (Resolver)

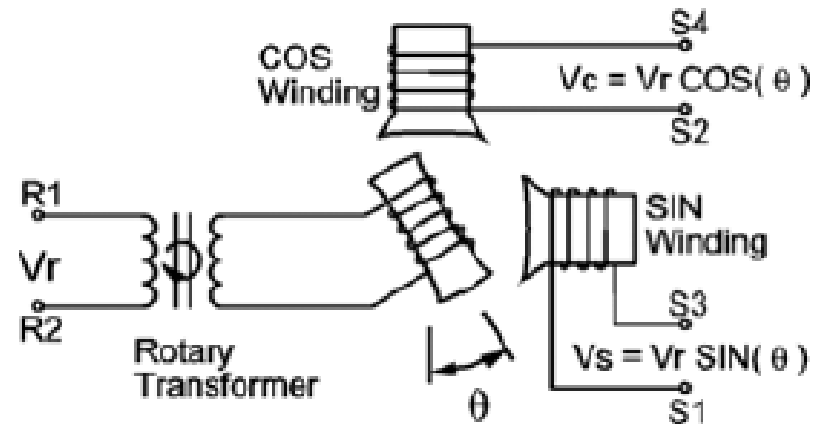
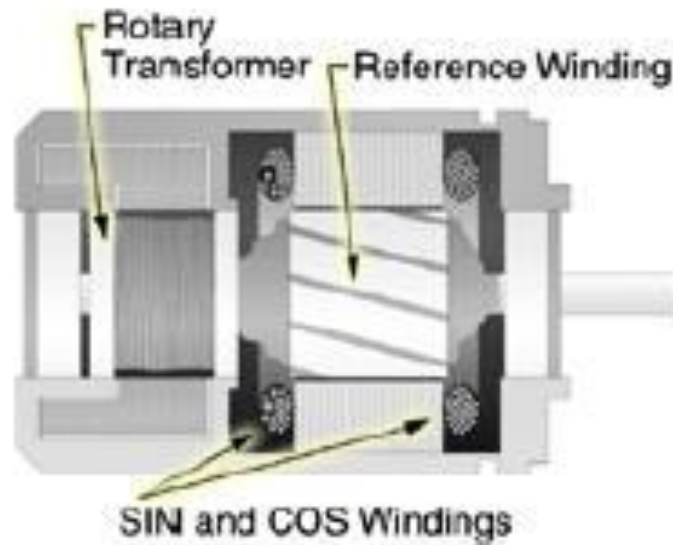
❖ چند نکته:

- ✓ شافت اینکودرهای نوری که در بخش قبل به انواع آنها پرداخته شد، اساسا سنسورهای موقعیت هستند که با پردازش سیگنال آنها در کنترلر، سرعت را بدست می آوریم.
- ✓ همچنین موقعیت روتور را می توان با انتگرال گیری از خروجی سنسورهای سرعت تاکوژنراتوری بدست آورد.
- ✓ لذا در ادامه فقط به بررسی رزولورها پرداخته می شود.

✓ رزولورها نوعی از سینکروها هستند که موقعیت مطلق را از القای الکترومغناطیسی اندازه گیری می نمایند.

❖ ساختمان رزولور:

در روتور آنها یک سیم پیچ و در استاتور دو سیم پیچ عمود بر هم وجود دارد. با تحریک سیم پیچ روتور، در سیم پیچهای استاتور ولتاژی متناسب با سینوس زاویه میان روتور و استاتور ایجاد می گردد.



$$V_c = V_r \cos \theta$$

$$V_s = V_r \sin \theta$$

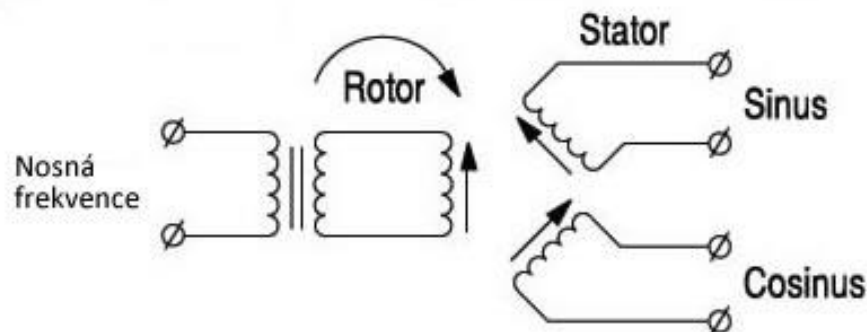
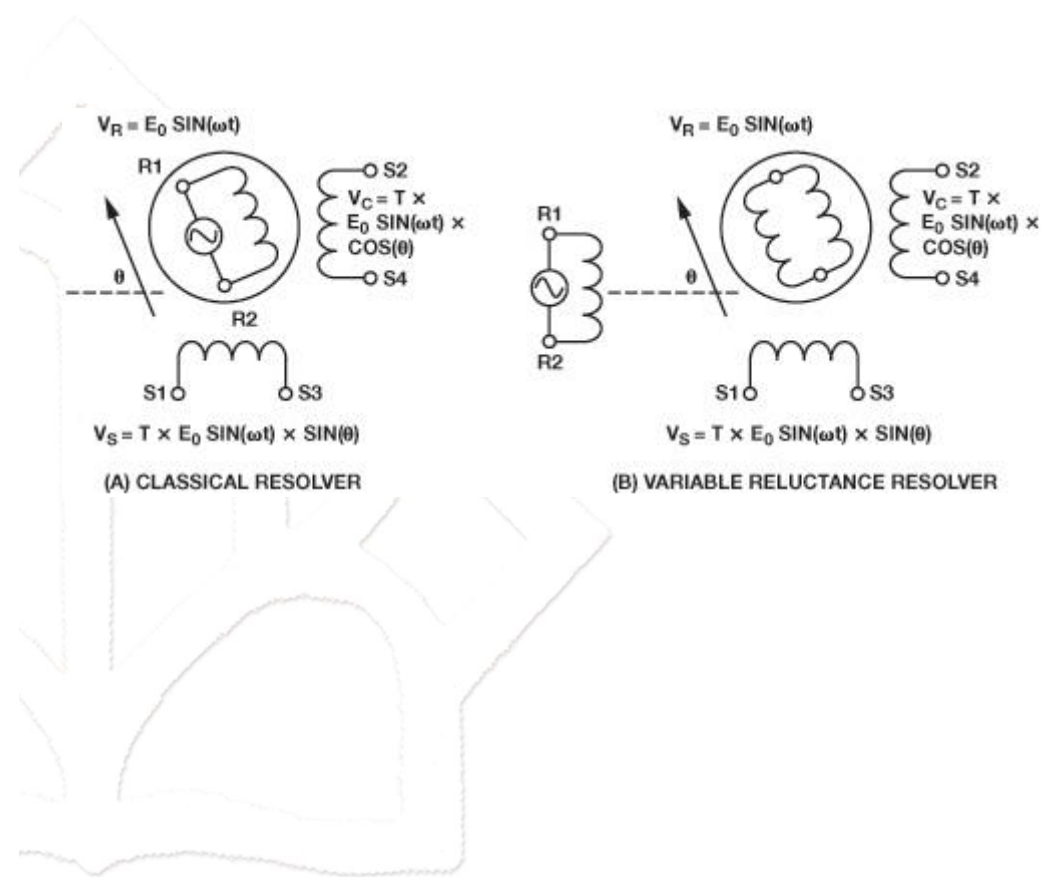
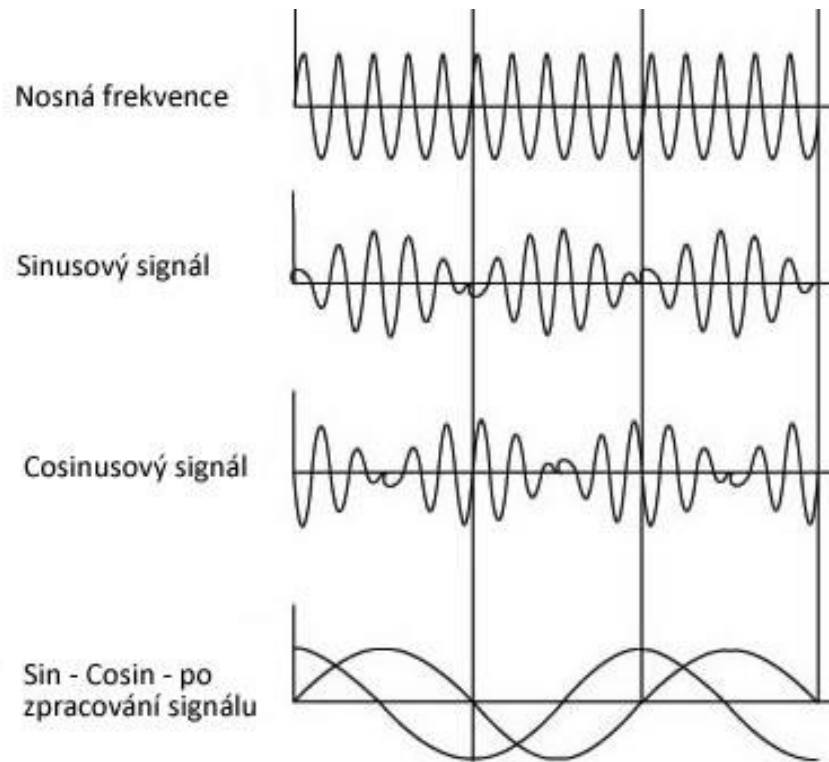
❖ ویژگیهای رزولورها:

- ۱- رزولوشن بسیار بالا
- ۲- دقت خوب ، مقاوم در مقابل نویز
- ۳- قابلیت اطمینان بالا مخصوصاً در محیطهای صنعتی
- ۴- آلوده مقاوم بودن در مقابل درجه حرارت و کوچکی
- ۵- اندازه گیری موقعیت مطلق که در نتیجه با قطع و وصل تغذیه سیستم کنترل، اطلاعات موقعیت از دست نمی رود.

- ✓ همچنین نوع بدون جاروبک رزولورها وجود دارد که در این نوع، توان الکتریکی سیم پیچ های دوار بدون تماس الکتریکی تامین می گردد. لذا در این نوع مشکلات جاروبک را نخواهیم داشت.
- ✓ اکثر رزولورها با ولتاژ مرجع موثر ۲ تا ۴۰ ولت و در فرکانس ۴۰۰ هرتز تا ۱۰ کیلو هرتز کار می کنند و دقت آنها از پنج arcmin تا نیم arcmin می باشد. (هر دقیقه ۰ / ۰۱۶۷ درجه می باشد).



❖ چند نمونه دیگر:





✓ سنسور گشتاور یکی از سنسورهای فرعی مورد استفاده در درایوهای الکتریکی است که اغلب در کنترل حلقه بسته گشتاور مورد استفاده قرار می گیرد.

✓ این سنسور یکی از گرانترین سنسورهای مورد استفاده در درایوهای الکتریکی که موارد استفاده صنعتی و تجاری آن بسیار محدود بوده و اغلب در کاربردهای آزمایشگاهی، کالیبراسیون و تست کار گرفته می شود.

❖ دلایل استفاده از سنسور گشتاور:

۱- کنترل دقیق گشتاور موتور در شرایط مختلف حالت دائم و گذرا در درایوهای کنترل حلقه بسته گشتاور

۲- کنترل دقیق تر سرعت در درایو کنترل حلقه بسته سرعت به عنوان لوپ کنترل داخلی (میانی)

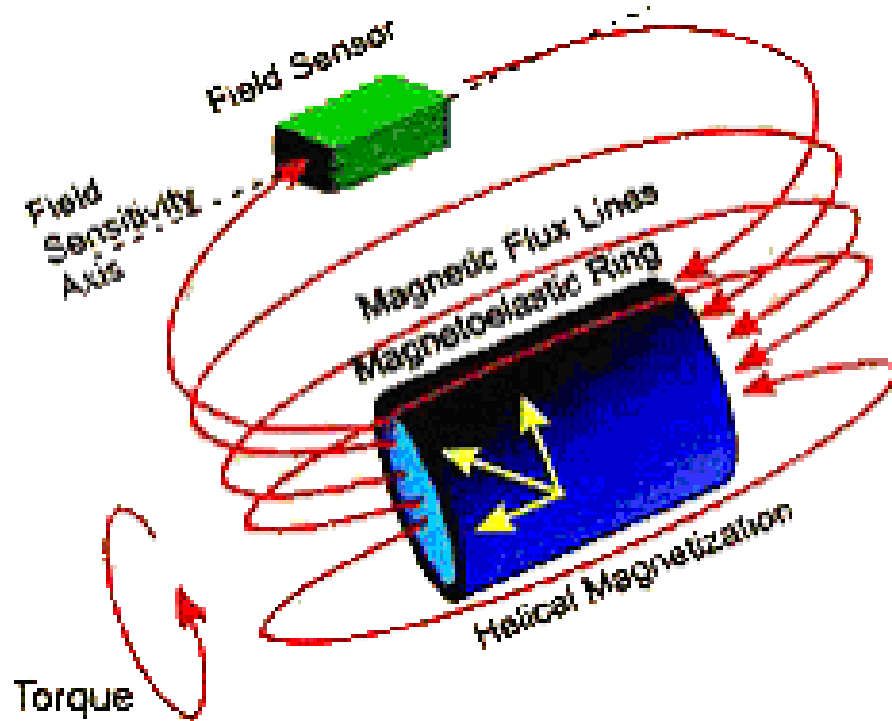
❖ تکنیک های بکار رفته برای اندازه گیری گشتاور در سنسورهای گشتاور:

۱- بر مبنای تنش مکانیکی و استفاده از حسگرهای پیزو و استرین گیج

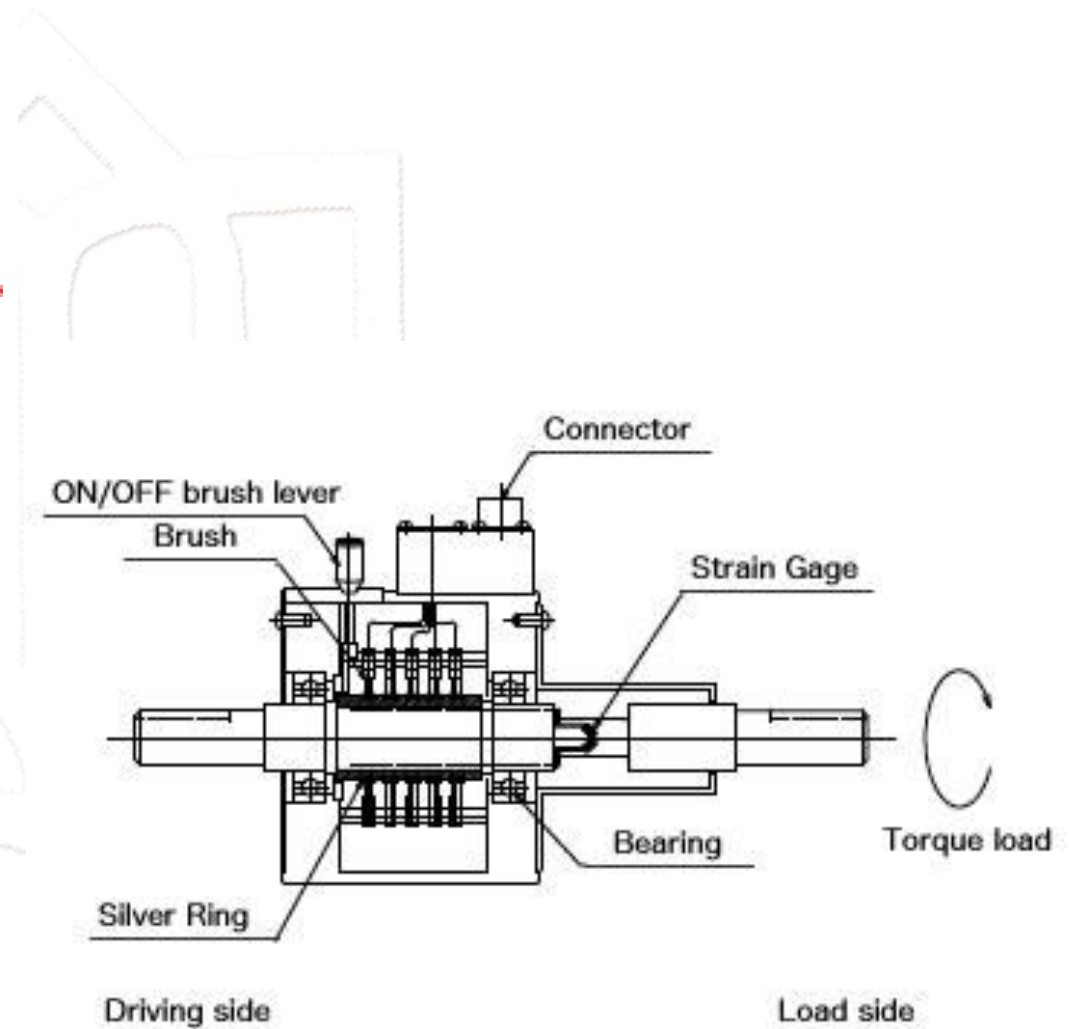
۲- بر مبنای گشتاور ایجاد شده در میدان مغناطیسی

✓ سنسور گشتاور مانند سنسورهای سرعت و موقعیت با محور موتور کوپل شده، اما از دو طرف با محورهای بار و موتور در ارتباط است.

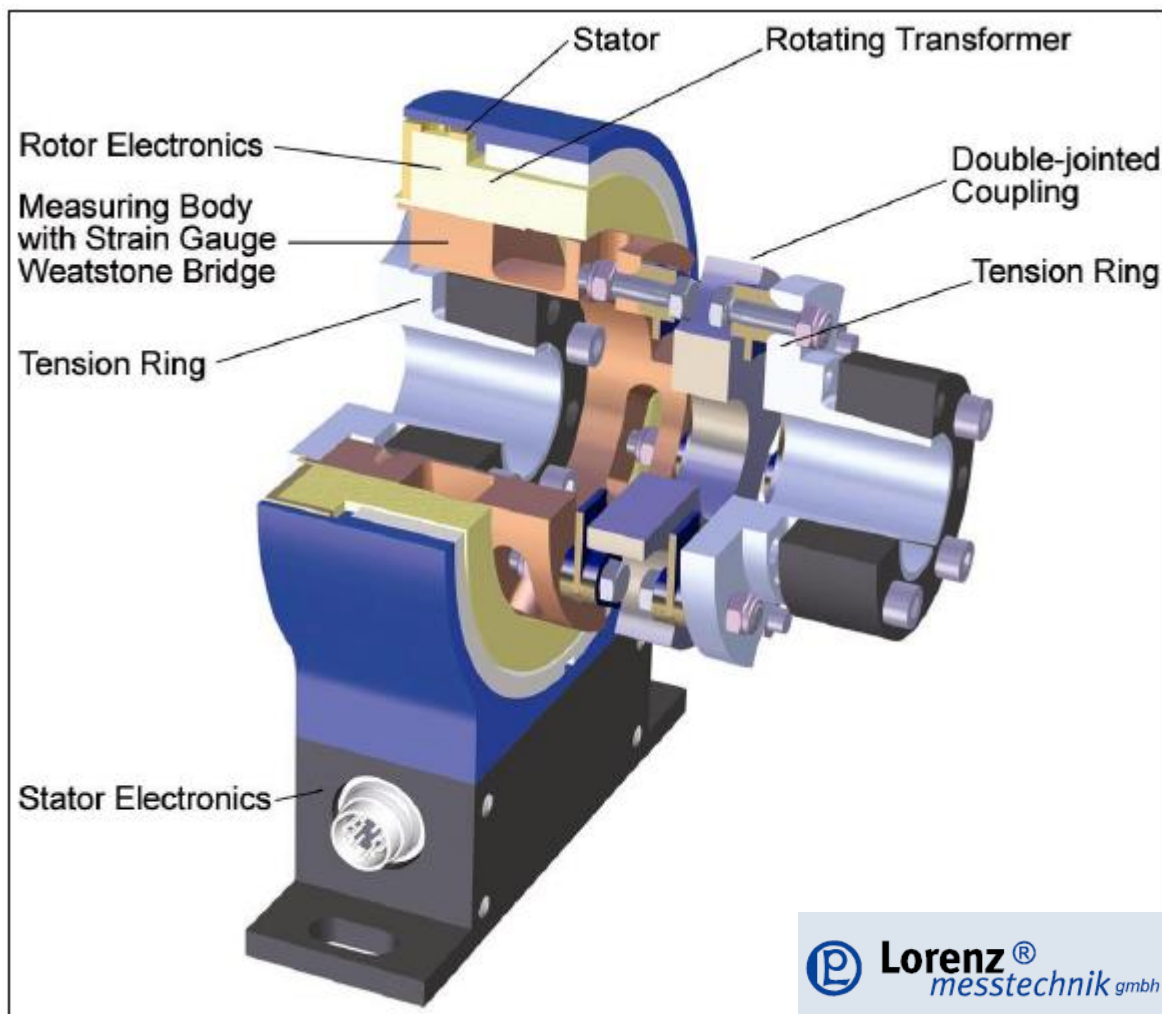
✓ به دلیل گران بودن این سنسور کاربرد صنعتی اش محدود بوده و در درایوهایی که نیازمند فیدبک گشتاور است، مقدار آنرا تخمین می زنند.



نوع مغناطیسی



نوع تنشی



Picture 1: Setup of Torque Sensor DR-2554



- ✓ استفاده از سنسورهای جریان و ولتاژ در اغلب درایوهای الکتریکی معمول است.
- ✓ اما از سنسورهای شار و گشتاور در کاربردهای صنعتی متداول به دلیل گرانی، پیچیدگی سخت افزار و ... بسیار کمتر استفاده می شود. بجای اندازه گیری مستقیم در کاربردهای صنعتی از روشهای تخمین شار و گشتاور استفاده می گردد.
- ✓ در خصوص سنسورهای سرعت و موقعیت، بسته به نوع کاربرد هم می توان مستقیماً از سنسور استفاده نمود و هم می توان سرعت و موقعیت روتور را تخمین زد. به درایوهای الکتریکی که از سنسور سرعت/موقعیت استفاده نمی کنند و این کمیتها را تخمین می زنند، **درایوهای سنسورلس و یا با روش کنترل سنسورلس** گویند.
- ✓ اخیراً به دلایل کاهش پیچیدگی و هزینه درایو، استفاده از روشهای کنترل سنسورلس بسیار رایج شده است.

❖ روشهای مختلف تخمین سرعت و موقعیت روتور در درایوهای الکتریکی:

- ۱- روشهای حلقه باز تخمین و استفاده مستقیم از روابط مدل دینامیکی موتور
- ۲- روشهای تخمین حلقه بسته: استفاده از رویتگرهای لیونبرگر، مود لغزشی، فیلتر کالمن، MRAS و روشهای هوشمند.

- ✓ روشهای کنترل سنسورلس موتورهای الکتریکی در درس الکترونیک قدرت ۲ ارائه خواهد گردید.



□ کنترل کننده ها در درایوهای الکتریکی

- ✓ تا دهه ۹۰ میلادی، الگوریتمهای کنترلی در درایوهای الکتریکی موتورها با مدارات آنالوگ پیاده سازی می شد.
- ✓ اما امروزه در تمامی درایوهای جدید موتورهای الکتریکی تمامی عملیات کنترلی در سطح درایو و یا سطح کاربر توسط پردازشگرهای دیجیتالی نظیر میکرو کنترلرها و DSP ها انجام می شوند.
- ✓ پیاده سازی الگوریتمهای کنترلی پیچیده نیازمند پردازشگرهای سریع می باشد.
- ✓ شرکتهای صاحب نام در عرضه پردازنده های دیجیتالی برای محرکه ها عبارتند از: موتورولا، میکروچیپ، تگزاس اینسترومنت و ...
- ✓ البته برخی از شرکتهای سازنده محرکه ها (درایوها) از پردازنده های خاص خود استفاده می کنند که معمولا در بازار به راحتی یافت نمی شوند.
- ✓ در هنگام ساخت یک محرکه باید پردازنده مناسب استفاده شود. باید به سرعت پردازنده (معیار MIPS)، مقدار حافظه فلاش و RAM، درگاههای ورودی و خروجی نظیر دیجیتال/آنالوگ بودن، امکانات ارتباطی (سریال، CAN، مدباس و ...) و غیره توجه نمود.

✓ بردهای کنترلی آماده متنوعی بنام Starter kit یا Evaluation board برای انجام پروژه ها در سطح آزمایشگاهی توسط سازندگان DSP ها یا میکروکنترلرها روانه بازار شده اند.

**eZdsp™ R2812 for TMS320R2812 DSP
+ Power supply + Code Composer
Studio for C28xx**



eZdsp™ R2812 for TMS320R2812 + Power Supply + CCS for C28xx