فصل اول:
مقدمه‌ای بر درایوهای الکتریکی

- مقدمه
- مبدل ها و عناصر الکترونیک قدرت
- عملکرد چند ربعی محرکه
- دینامیک سیستم موتور – بار و انواع بارها
- انواع درایوهای الکتریکی
- حسگرها (سنسورها) در درایوهای الکتریکی و کنترل کننده ها

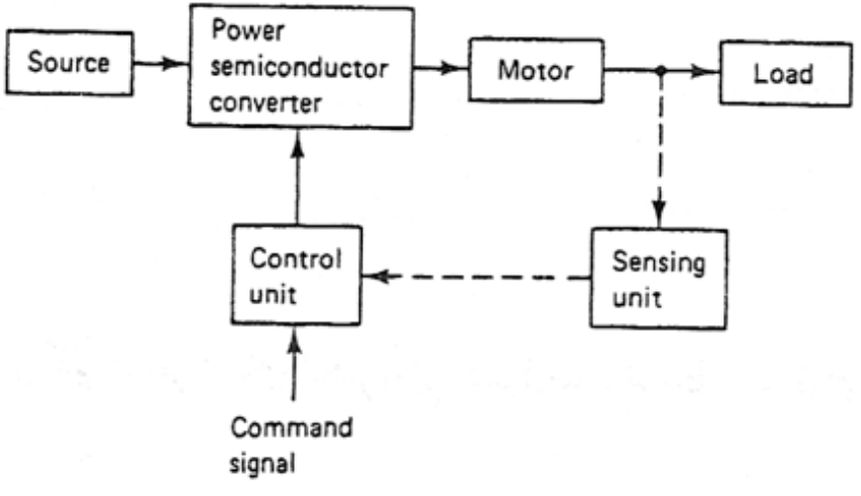
- **محرکه الکتریکی (یا درایو الکتریکی): به یک سیستم کنترل مبتنی بر مبدلهای نیمه‌هادی (الکترونیک قدرت) گفته می شود که برای تنظیم یا کنترل حرکت یک بار مکانیکی با استفاده از یک موتور الکتریکی بکار می‌رود.**

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

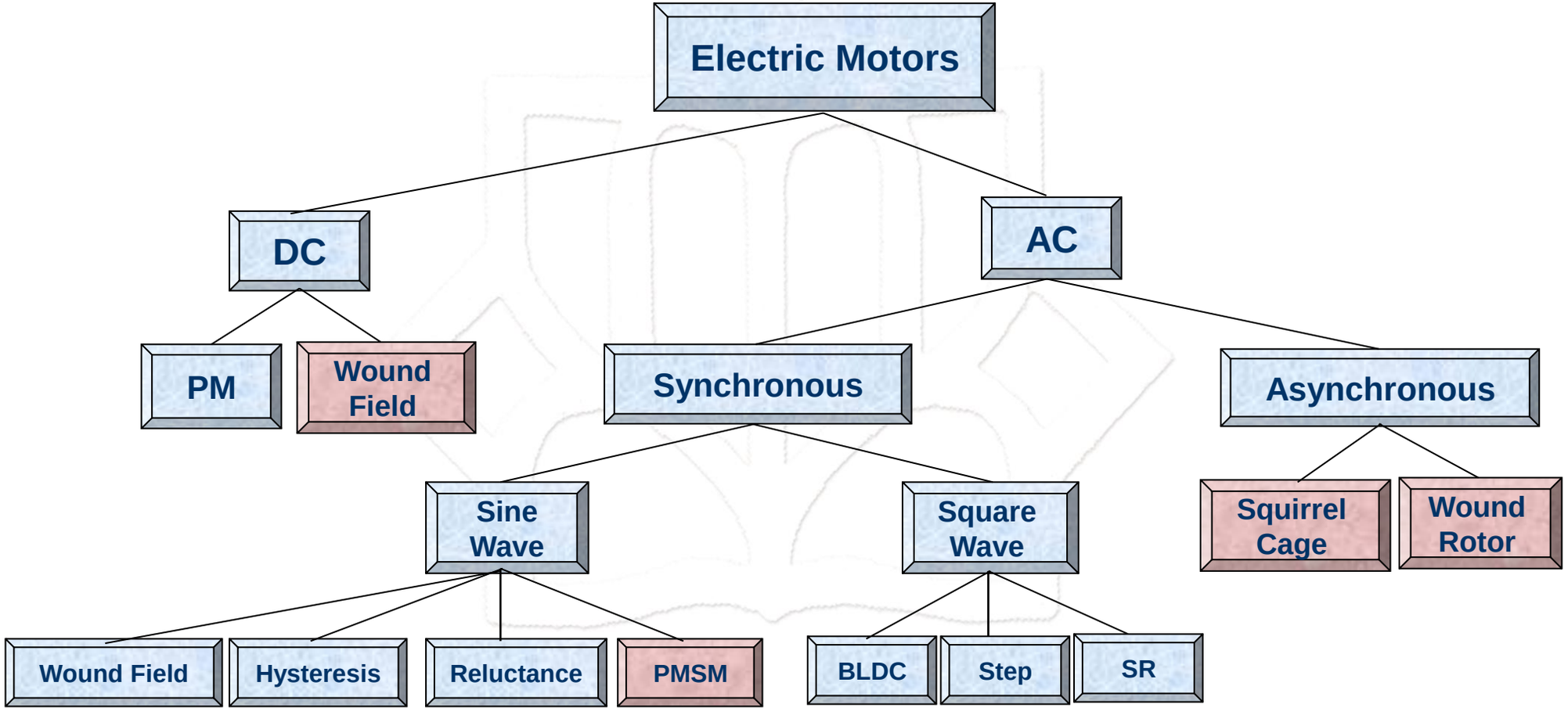
- **منظور از کنترل حرکت (کنترل موقعیت/سرعت/گشتاور): تغییرات عمدی و کنترل شده ولتاژ، جریان و فرکانس تغذیه که منجر به تغییر سرعت (گشتاور یا موقعیت) موتور در بازه مشخص و دلخواهی می شود.**

- **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 باطری باشد.
- **مبدل نیمه‌هادی قدرت:** انتقال قدرت از منبع به موتور تنظیم تغذیه موتور به نحوی که مشخصه‌های موتور در مقادیر مطلوب قرار گیرند.
- **موتور:** مبدل انرژی الکترومکانیکی که توان الکتریکی را به توان مکانیکی (کار) تبدیل می کند.
- **واحد اندازه‌گیری:** تشخیص و شناسایی پارامترهای خاصی از موتور نظیر جریان، ولتاژ، گشتاور، سرعت و غیره را انجام می‌دهد.
- **واحد کنترل:** در این واحد، با توجه به فیدبکهای ارسال شده توسط واحد اندازه‌گیری، فرمانهای کنترلی مبدل ساخته می شوند.



بلوک دیاگرام کلی درایو الکتریکی

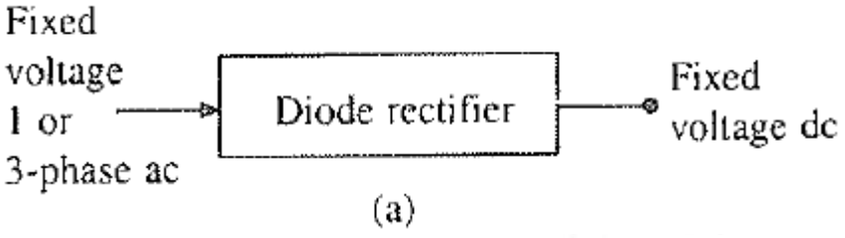


انواع متداول موتورهای الکتریکی

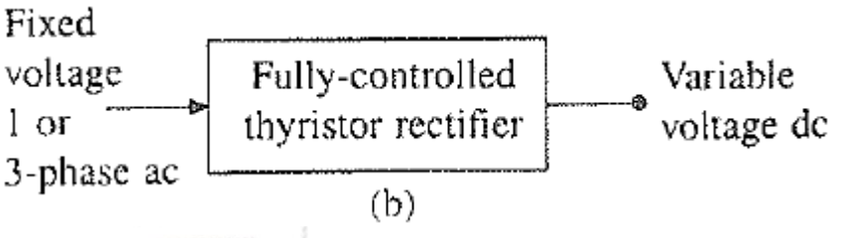
انواع مبدل های مورد استفاده در درایوهای الکتریکی و کاربرد هر یک از آنها

نوع مبدل	نحوهٔ تبدیل انرژی الکتریکی	کاربردها
۱ ـ یکسوکننده‌های قابل کنترل	تبدیل ac به dc	کنترل موتورهای dc، القایی و سنکرون
۲ ـ برشگرها	ولتاژ dc ثابت به ولتاژ dc متغیر	کنترل موتورهای dc و القایی
۳ ـ کنترل‌کننده‌های ولتاژ ac	ولتاژ ac ثابت به ولتاژ ac متغیر در فرکانس یکسان	کنترل موتورهای القایی
۴ ـ 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 ـ سیکلوکنورترها	تبدیل منبع ac با ولتاژ و فرکانس ثابت به ولتاژ ac با دامنه و فرکانس متغیر	کنترل موتورهای القایی و سنکرون

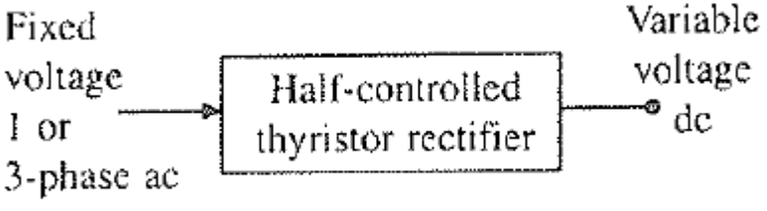
➢ انواع مبدل های AC به DC یا یکسوسازها



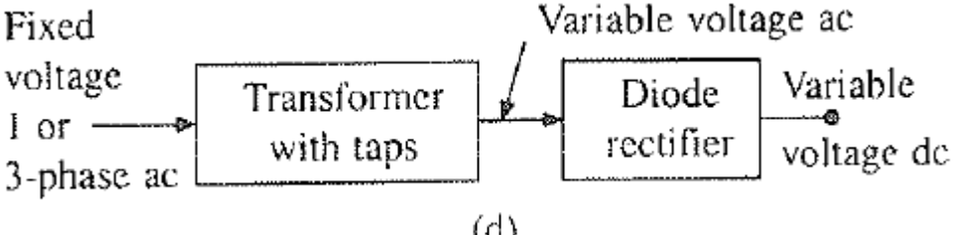
(a)



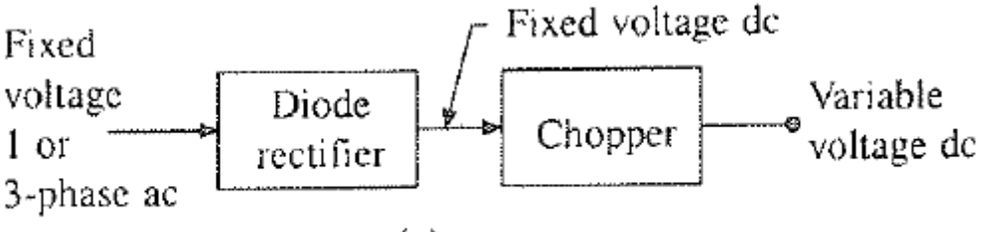
(b)



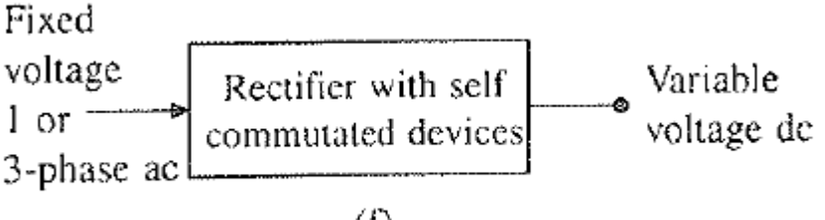
(c)



(d)

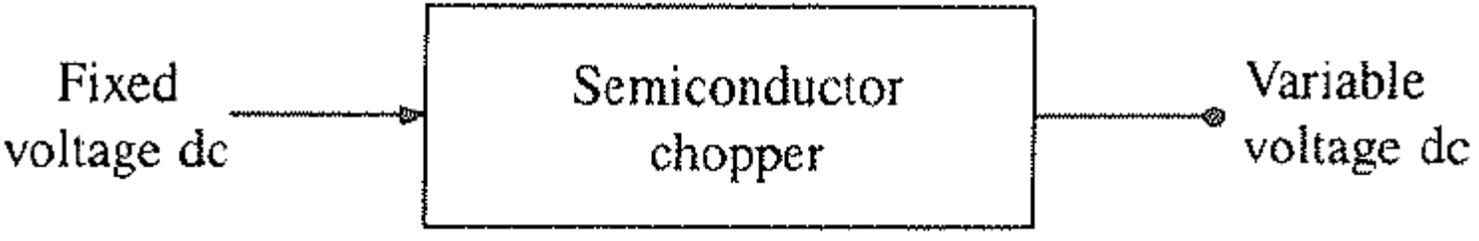


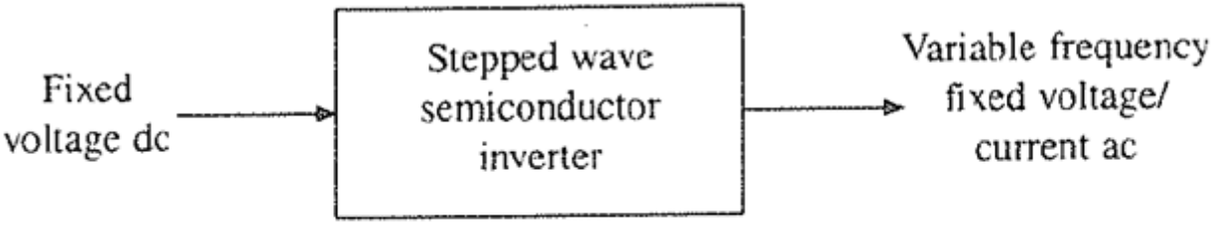
(e)



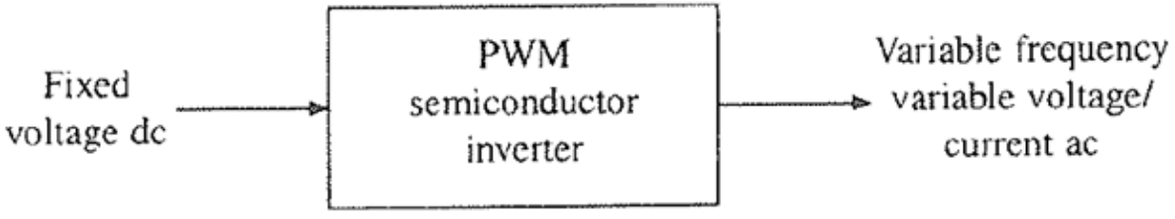
(f)

➢ مبدل DC به DC یا چاپر





(a) Stepped wave inverters



(b) Pulse width modulated inverters

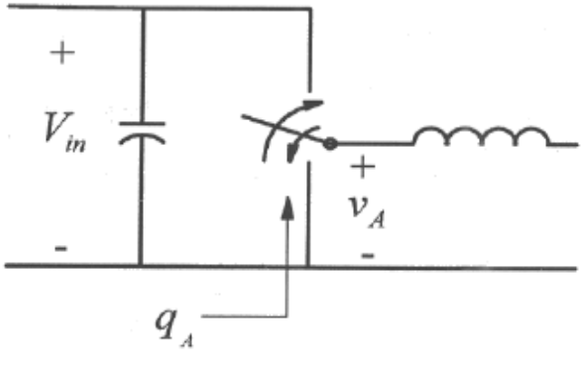
Fig. 1.5 Inverters

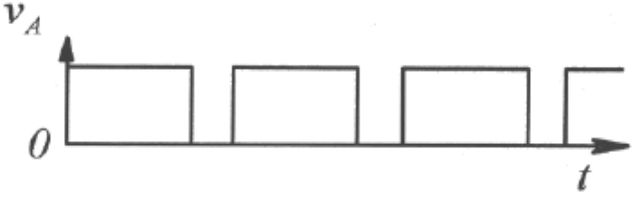
Fig. 1.6 Cycloconverter

- ✓ عناصر نیمه‌هادی قدرت مورد استفاده در محرکه‌های (درایوهای) الکتریکی به عنوان سوئیچ کنترل شده جهت قطع و وصل جریان به کار می روند.
- ✓ لذا ناحیه عملکردی عناصر نیمه‌هادی، 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 نیمه‌هادی برای یک مدار الکترونیک قدرت:**

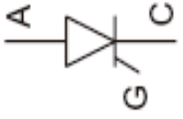
1) توان مورد نیاز
2) سرعت کلیدزنی (فرکانس سوئیچینگ)
3) ضریب بهره بالاتر
4) قیمت تمام شده
5) تلفات کمتر





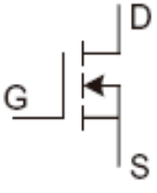
- DIODE (1955)

- THYRISTOR (1958)

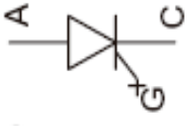


- BIPOLAR POWER TRANSISTOR (BPT or BJT) (1975)

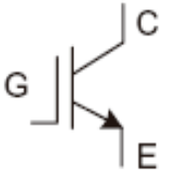
- POWER MOSFET (1975)



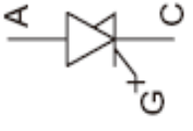
- GATE TURN-OFF THYRISTOR (GTO) (1980)



- INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR (IGBT) (1985)



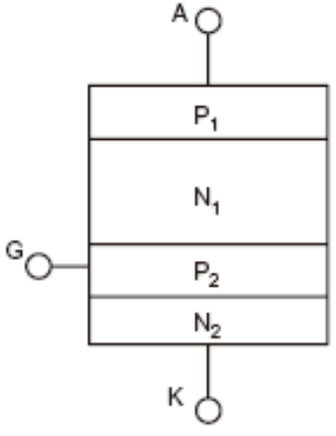
- INTEGRATED GATE-COMMUTATED THYRISTOR (IGCT) (1996)

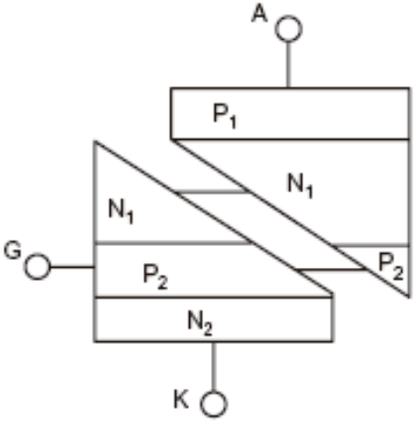


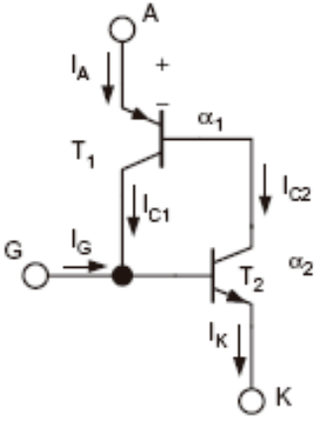
❑ عناصر الکترونیک قدرت

➢ تریستور

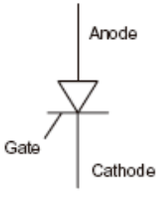
- ✓ تریستورها بالاترین قابلیت تحمل جریان عبوری و ولتاژ معکوس را دارند.
- ✓ تریستورهای تجارتی تا ۴۰۰۰ ولت و ۳۰۰۰ آمپر هم در دسترس هستند.
- ✓ برای رسیدن به مقادیر ولتاژ و جریان بالاتر آنها را سری – موازی می کنند.

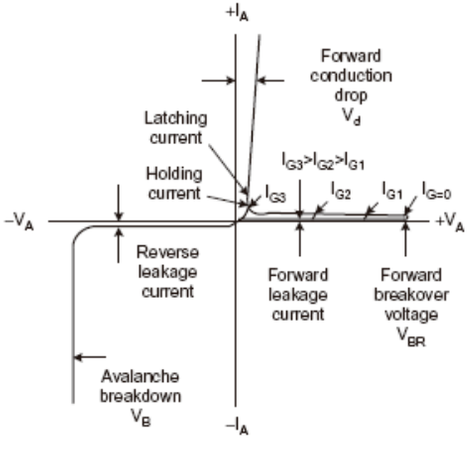






شماتیک ساختمان و مدار معادل یک تریستور





مشخصه ولت-آمپر (V-I) تریستور

➢ ویژگی های تریستورها

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

۲- فرکاانس سوئیچینگ بسیار پائین

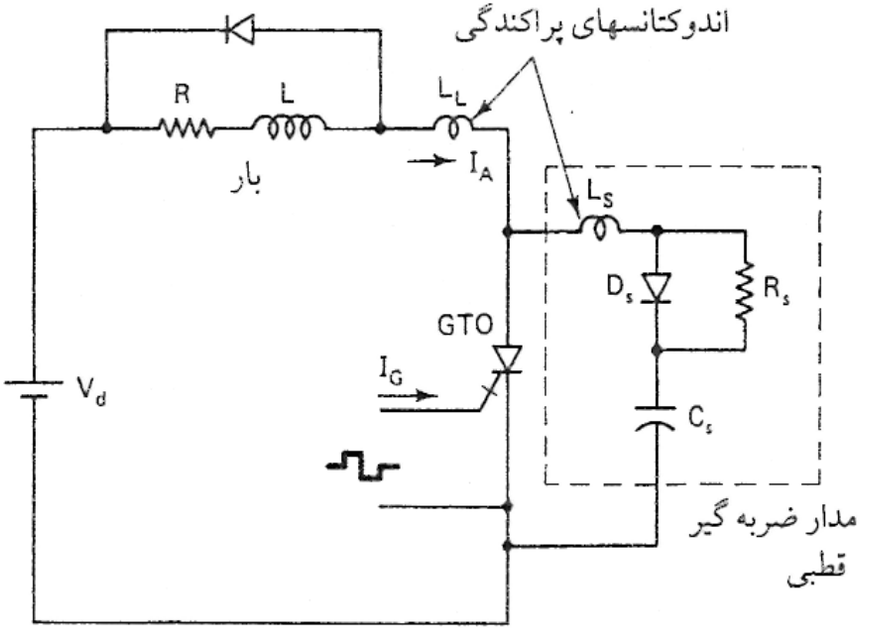
۳- نیازمند به مدار کموتاسیون جهت قطع نمودن آن

❑ عناصر الکترونیک قدرت

➢ تریستور

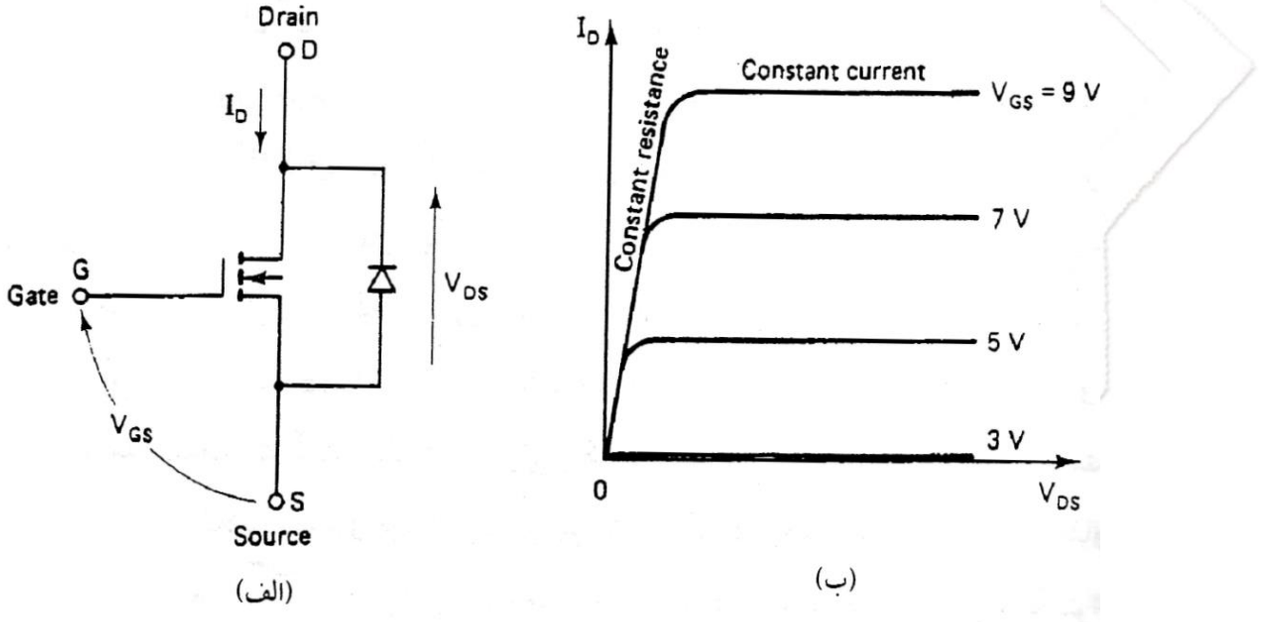
➢ GTO (تریستور خاموش شونده از گیت)

- ✓ تریستوری است که با یک پالس جریان منفی می‌توان 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 GTOنسبت به تریستور بیشتر بوده و تلفات آن نیز نسبت به تریستور و مدارهای جانبی‌اش کمتر است.
- ✓ GTO های تجاری با مقادیر نامی تا ۲۵۰۰ ولت و جریان ۲۰۰۰ آمپر موجود هستند.



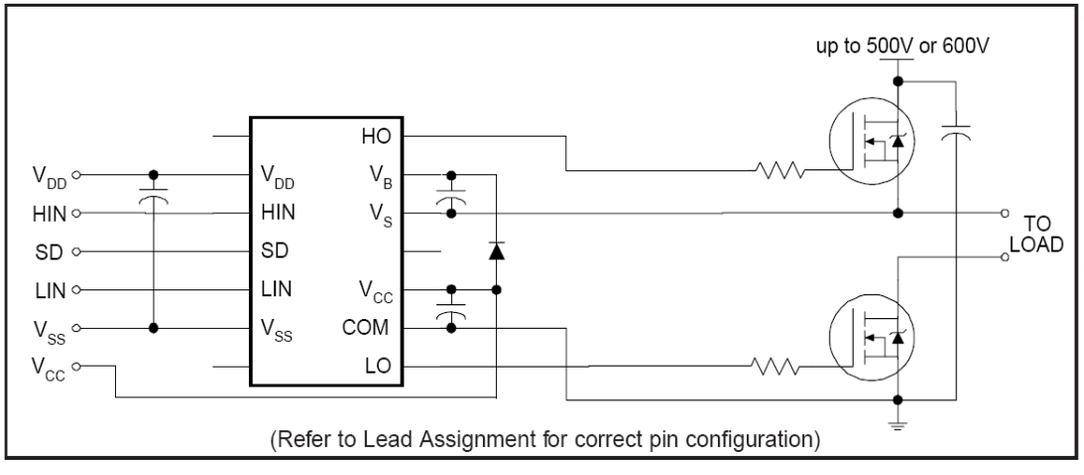
شکل ۱-۱۲ مدار برشگر با GTO و ضربه گیر قطبی

- ✓ 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 می شود. این ناحیه متناظر با ناحیه اشباع کار ترانزیستور است.
- ✓ برای قطع جریان ماسفت کافی است ولتاژ صفر ولت به گیت اعمال شود.

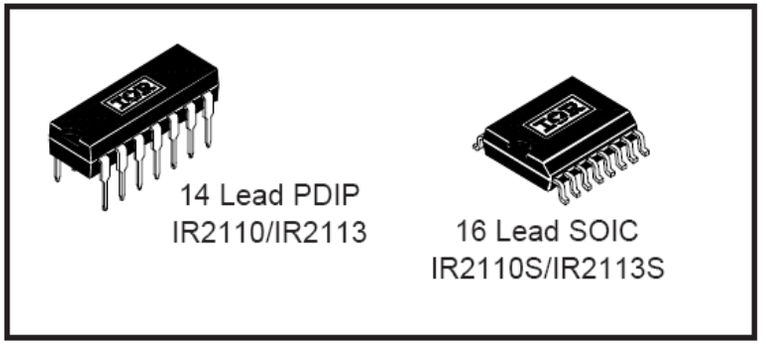


ماسفت قدرت (الف) نماد مداری (ب) مشخصه I_D - V_{DS}

- ✓ 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 شده‌اند که به نام آی سی سوئیچ درایور شناخته می‌شوند.
- ✓ در شکلهای زیر نمونه ای از درایور سوئیچ برای ماسفت قدرت و مدار مورد استفاده آنرا نمایش می دهد.



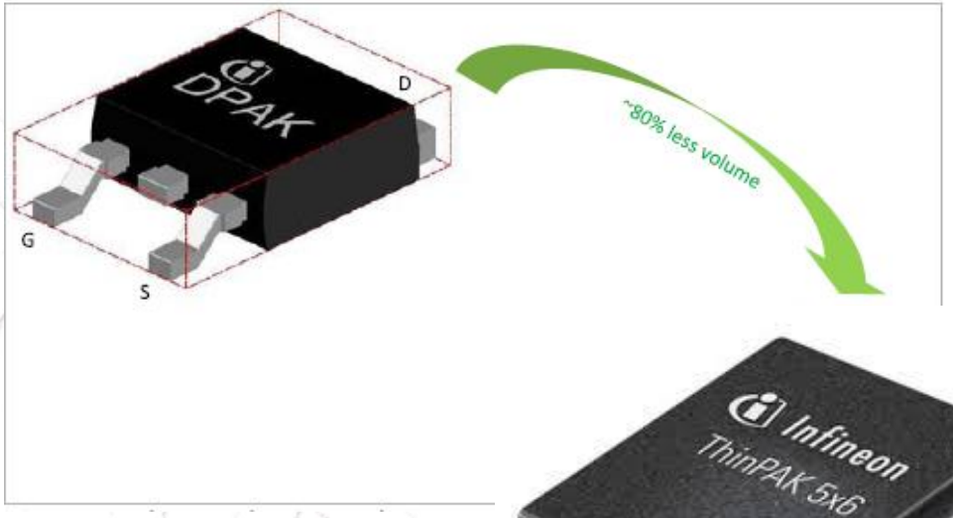
(ب) استفاده از درایور ماسفت در مدار قدرت



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

❑ عناصر الکترونیک قدرت

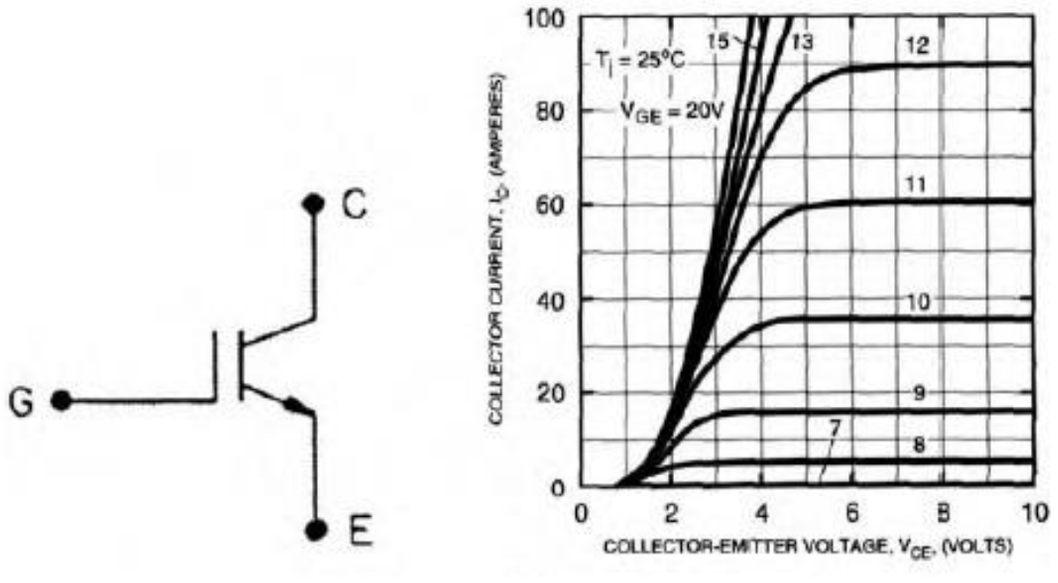
➢ ماسفت قدرت (Power MOSFET)



درایو ماسفت قدرت:

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

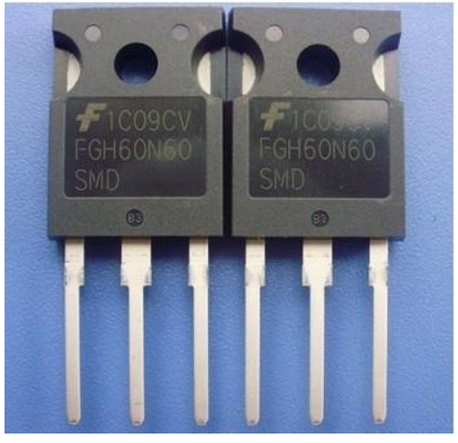
- ✓ IGBT یک المان ترکیبی است که از ترکیب یک ترانزیستور قدرت و یک ماسفت بدست می آید.
- ✓ این المان، در حقیقت یک ترانزیستور دوقطبی است که در مدار محرک آن (بیس آن) یک ماسفت قرار دارد.
- ✓ IGBT هم مزایای ترانزیستور قدرت BJT و هم مزایای ماسفت قدرت را داراست.
- ✓ این المان با پالس ولتاژ ۱۰ تا ۱۵ ولت روشن شده و با اعمال پالس منفی ۵- ولت خاموش می‌گردد.
- ✓ 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 ٦ تایی IGBT همراه با مدارات درایور بنام ماژول هوشمند قدرت IPM در کاربردهای سه‌فاز زیاد استفاده می شوند.

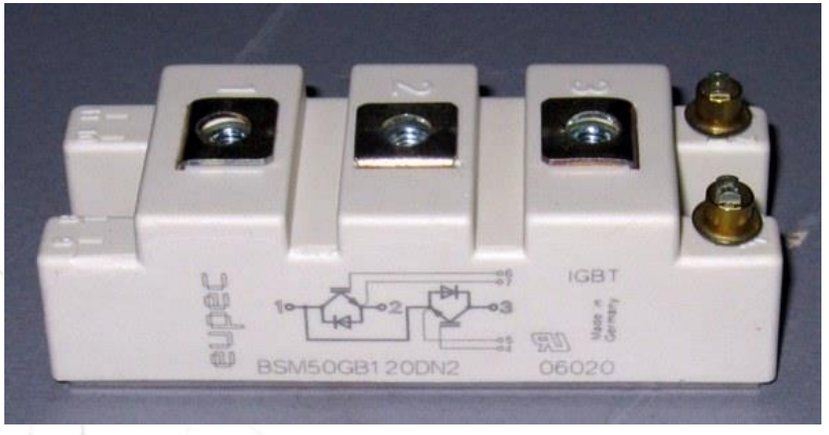


مدل مداری IGBT و مشخصه‌های V-I آن

❑ عناصر الکترونیک قدرت

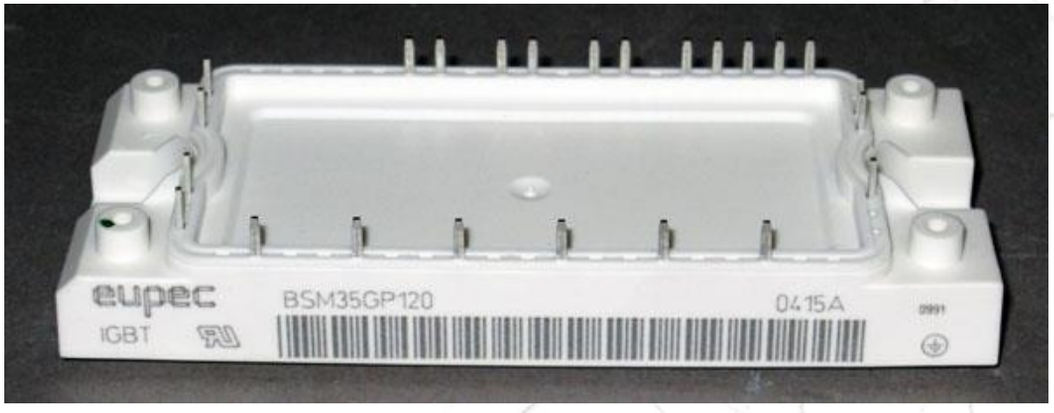
➢ ترانزیستور دو قطبی قدرت با گیت عایق شده (IGBT)

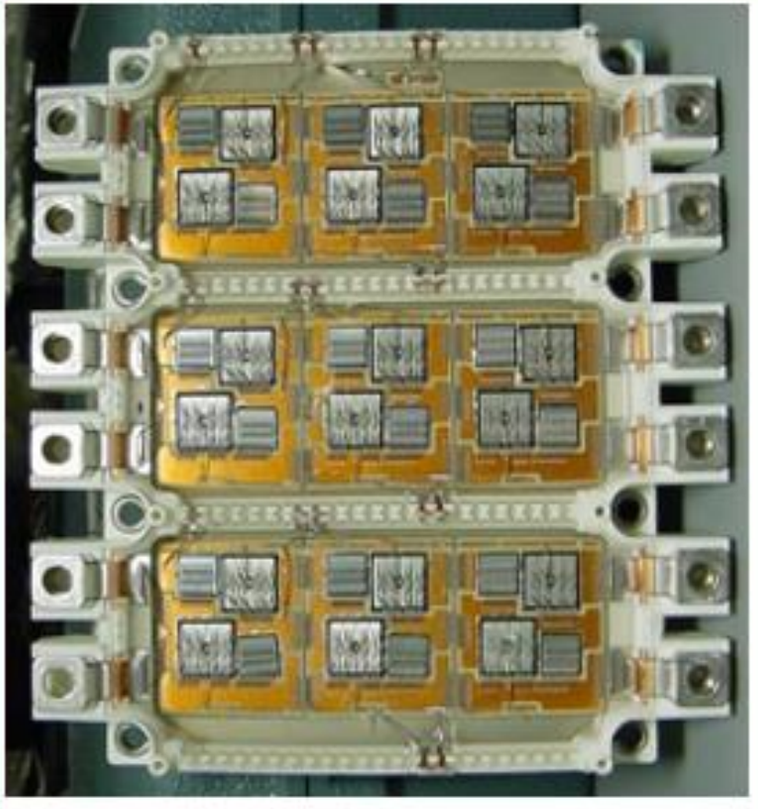




➢ ترانزیستور دو قطبی قدرت با گیت عایق شده (IGBT)

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

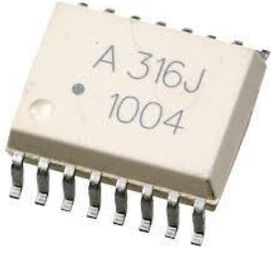




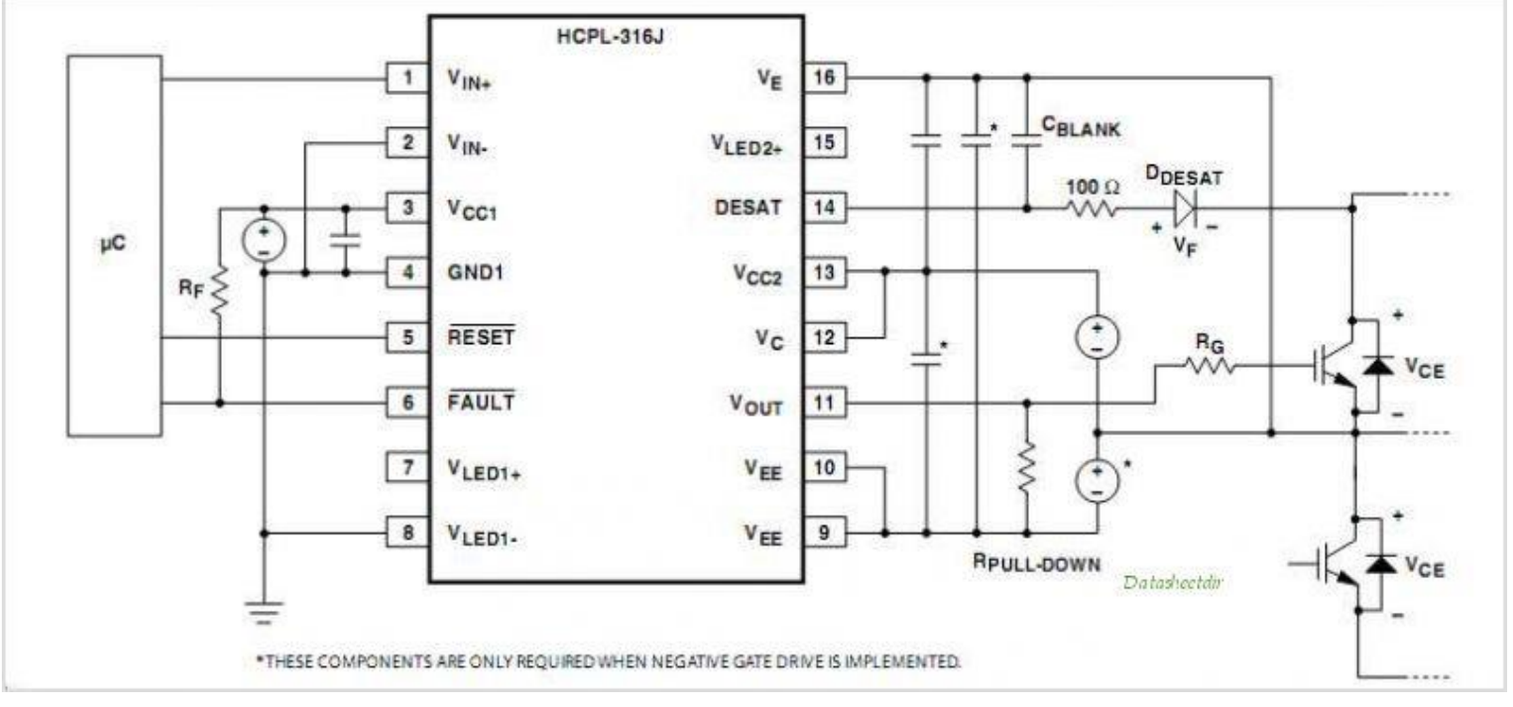
IGBT 3-phase power module, prior generation

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

- ✓ 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.

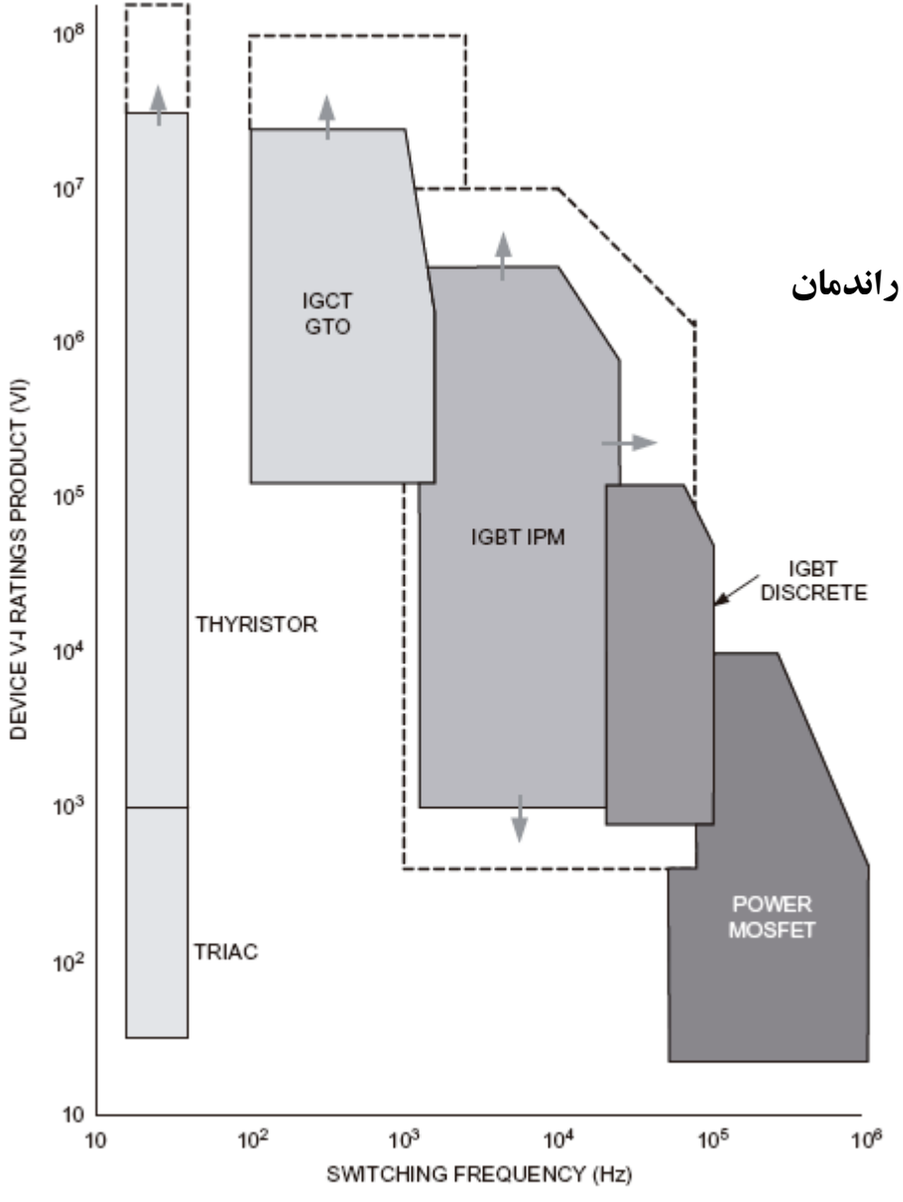


- ✓ برخی درایورهای سوئیچها نظیر آی سی HCPL 316J هوشمند بوده و در صورت عبور جریان بسیار زیاد از آنها، سیگنال فالت تولید می کنند.



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.



➢ مقایسه ویژگی های برخی ادوات نیمه هادی

	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	2nd 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 V/µs	Motor drives HVDC, SVC etc. Built-in diode
16. Comments	Body diode can carry full current but sluggish (t_{rr} = 150 ns) I_{pk} = 56 A	Large power range Very important device currently * Reverse blocking available	High uncontrollable surge current	High uncontrollable surge current *dv/dt* = 4000 V/µs
	*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 می‌کنیم.
- ✓ همچنین، در محرکه های الکتریکی، یک موتور (با داشتن گشتاور مثبت) می تواند در دو جهت راستگرد (مثبت) و چپگرد (منفی) بچرخد.
- ✓ در محرکه‌های پیشرفته ماشین الکتریکی بصورت ژنراتور نیز می‌تواند عمل کند که برای آن دو جهت مثبت و منفی در نظر می‌گیریم.

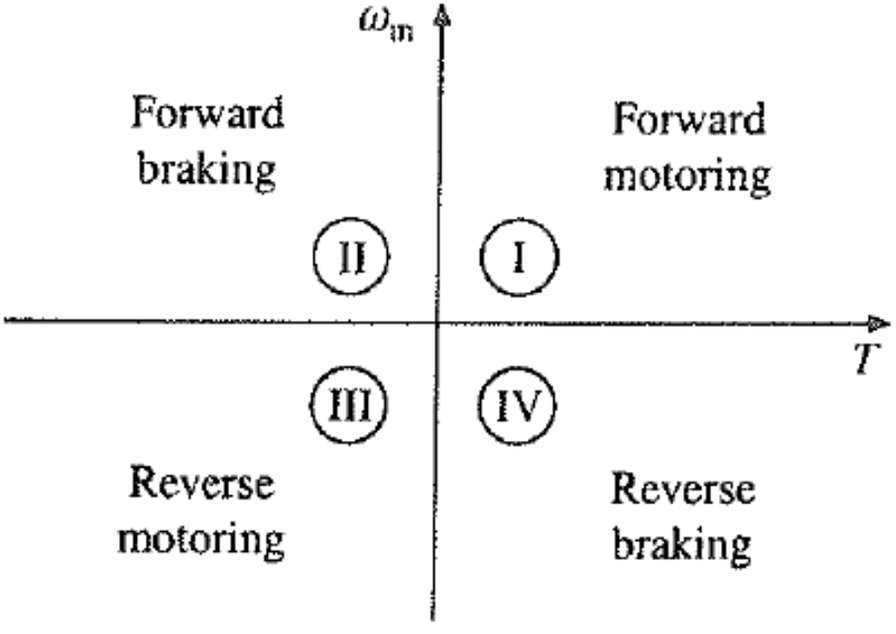


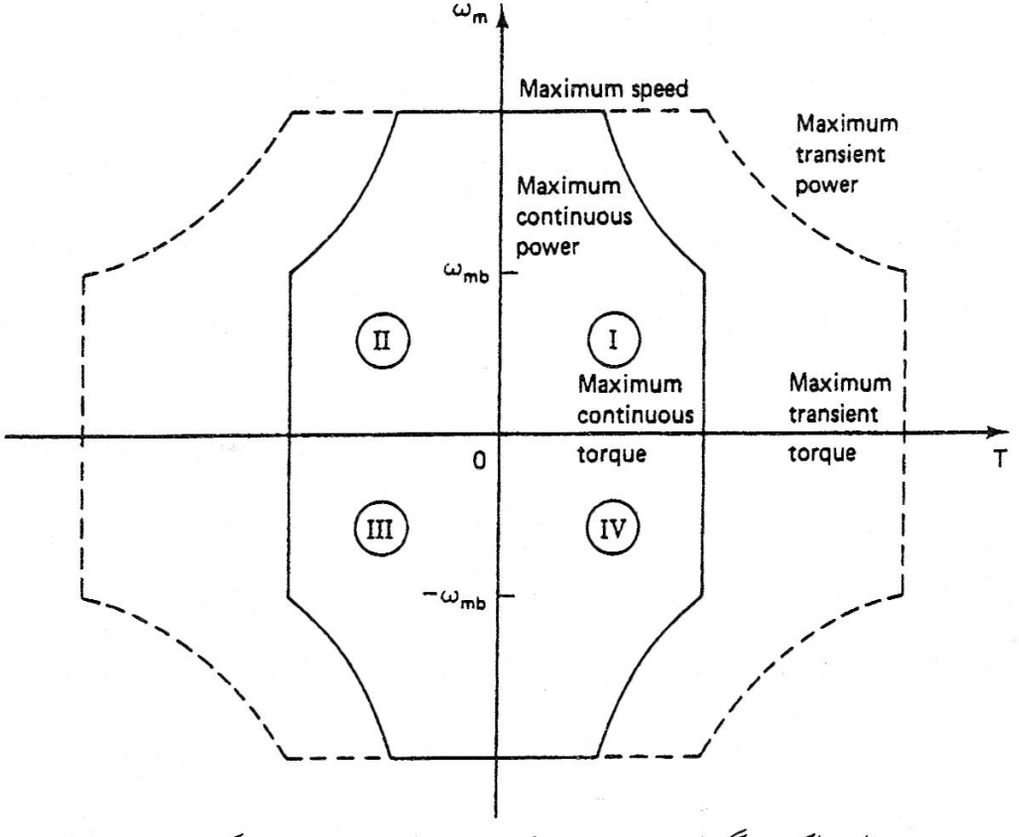
Fig. 2.2 Multiquadrant-operation of drives

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

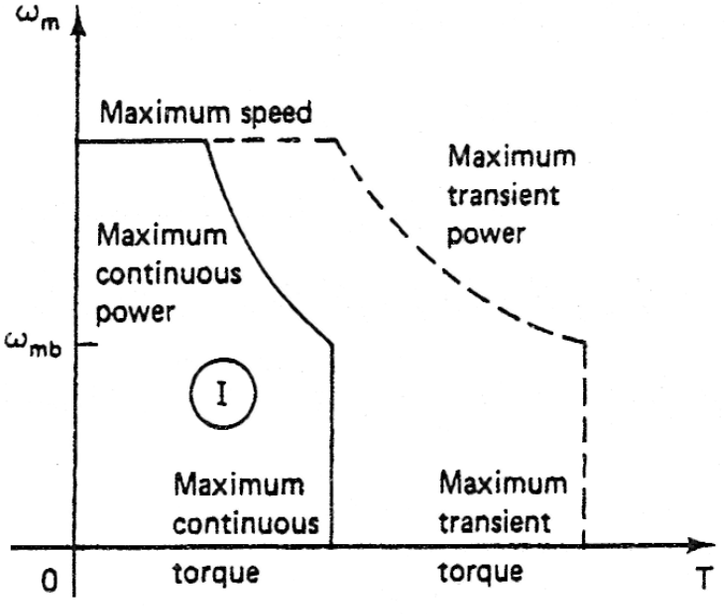
❑ عملکرد چند ربعی محرکه

➢ نواحی کار دائم و کار گذرا

- ✓ **خطوط توپر نشان دهنده ماکزیمم حدود سرعت، گشتاور و توان یک محرکه برای کار در 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



❑ عملکرد چند ربعی محرکه

➢ تغییر نقطه کار محرکه با جابجایی در ربع های کاری

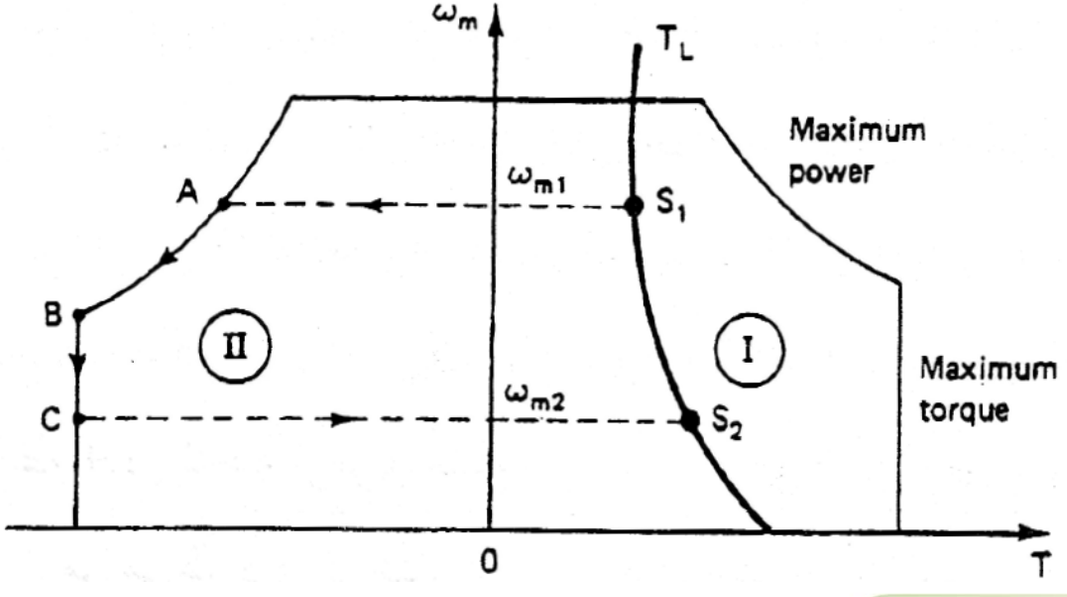
✓ **می توان با استفاده از عملکرد چهار ربعی محرکه، تغییرات زیر را در حداقل زمان انجام داد:**

۱- کاهش سرعت در همان جهت چرخش

۲- معکوس شدن سرعت

۳- افزایش سرعت در همان جهت چرخش

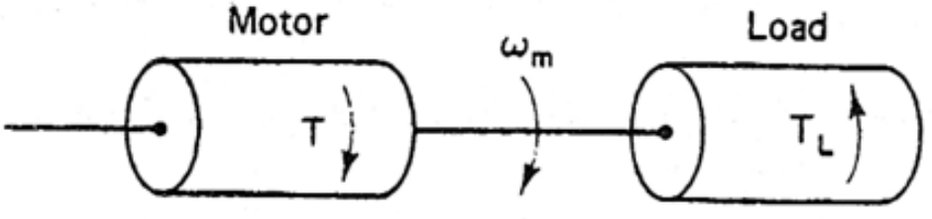
✓ **برای کاهش سرعت از نقطه S_1، برای مدت کوتاهی، موتور با حداکثر توان و گشتاور در ناحیه ترمزی کار خواهد نمود و پس از رسیدن سرعت به مقدار دلخواه با تغییر عملکرد مبدل به موتوری، به نقطه کار جدید S_2 خواهیم رسید.**



❑ دینامیک سیستم موتور – بار و انواع بارها

➢ معادله دینامیکی حرکت دورانی

- 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.



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

➢ مولفه های گشتاور بار

✓ گشتاور بار شامل سه مولفه زیر است:

$$T_l = T_L + T_W + T_F \qquad (۲)$$

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

$$T_w = C\omega_m^2 \qquad (۳)$$

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

✓ مولفه‌های گشتاور اصطکاک:

$$T_v = B\omega_m \qquad (٤)$$

۱- گشتاور چسبندگی یا ویسکوزیته T_v: متناسب با سرعت است.

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.

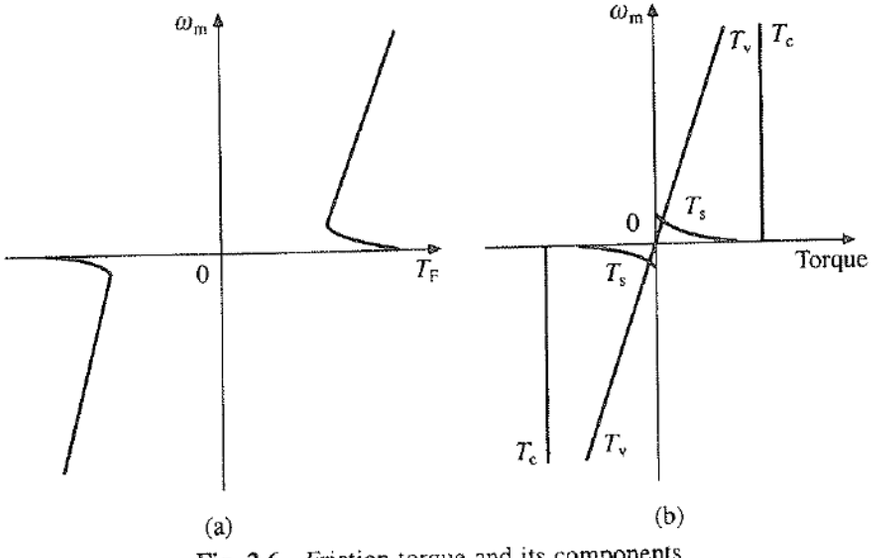


Fig. 2.6 Friction torque and its components

دانشگاه کاشان / دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر / گروه قدرت / درس درایوهای الکتریکی (دوره کارشناسی) / دکتر حلوایی

✓ لذا گشتاور بار برابر خواهد بود با:

$$T_l = T_L + B\omega_m + T_c + T_s + C\omega_m^2 \qquad (۵)$$

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

$$T_l = T_L + B\omega_m + T_c + C\omega_m^2 \qquad (۶)$$

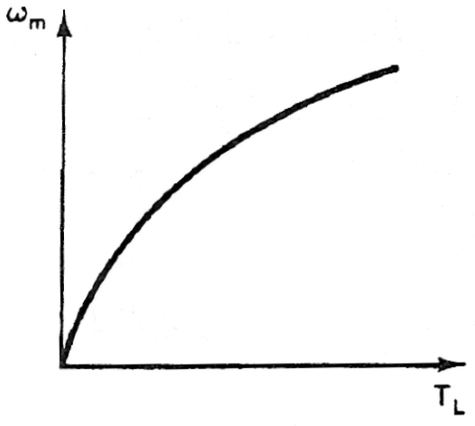
✓ همچنین در بسیاری از کاربردها مولفه های گشتاور باد T_w و اصطکاک کولمبی T_c ناچیز هستند. لذا:

$$T_l = T_L + B\omega_m \qquad (۷)$$

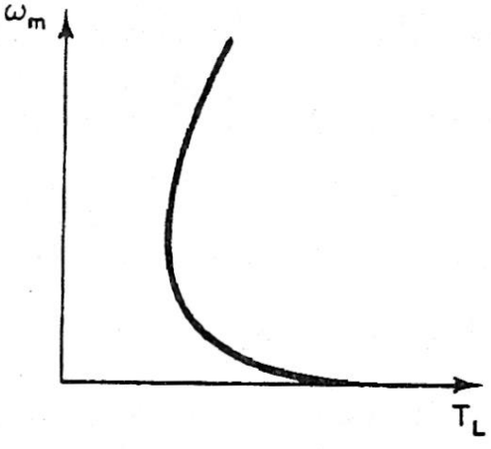
✓ در نهایت معادله دینامیکی حرکت دورانی برای محاسبه سرعت بصورت زیر خواهد بود:

$$T = J\frac{d\omega_m}{dt} + T_L + B\omega_m \qquad (۸)$$

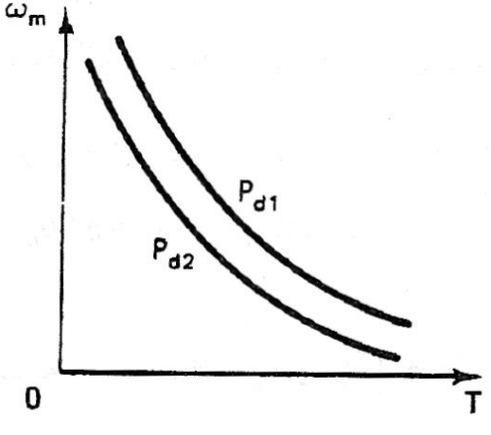
➢ کلاسه بندی و طبیعت انواع گشتاور بار مفید یا T_l



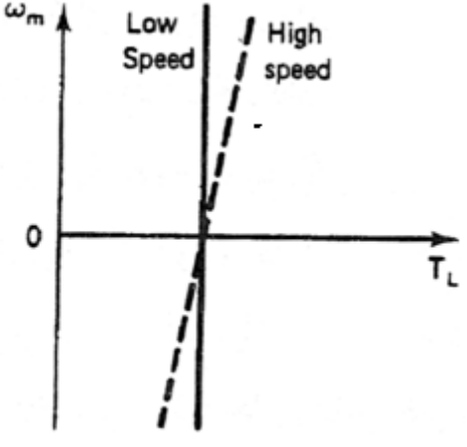
(الف) بارهای پنکه‌ای و پمپهای گریز از مرکز



(ب) بارهای کششی



(ج) محرکه‌های پیچاننده‌ها



(د) جرثقیل و بالابرها

➢ **طبقه‌بندی انواع گشتاور بار:**

۱- گشتاور بار فعال (Active)

۲- گشتاور بار غیرفعال (Passive)

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

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

$$T = J\frac{d\omega_m}{dt} + T_L \qquad (۹)$$

- ✓ مطابق رابطه دینامیک حرکت (۹) 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 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:

$$T_e = T_{le}\ ,\quad \frac{d\omega_{me}}{dt} = 0 \qquad (۱۰)$$

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

$$T_e + \Delta T = J\frac{d(\omega_{me} + \Delta\omega_m)}{dt} + T_{le} + \Delta T_l \qquad (۱۱)$$

انحرافات کوچک گشتاور را می‌توان به اینصورت خطی‌سازی نمود:

$$\Delta T = \left(\frac{dT}{d\omega_{me}}\right)\Delta\omega_m \quad , \quad \Delta T_l = \left(\frac{dT_l}{d\omega_{me}}\right)\Delta\omega_m \qquad (۱۲)$$

$$J\frac{d(\Delta\omega_m)}{dt} + \left(\frac{dT_l}{d\omega_m} - \frac{dT}{d\omega_m}\right)\Delta\omega_m = 0 \qquad (۱۳)$$

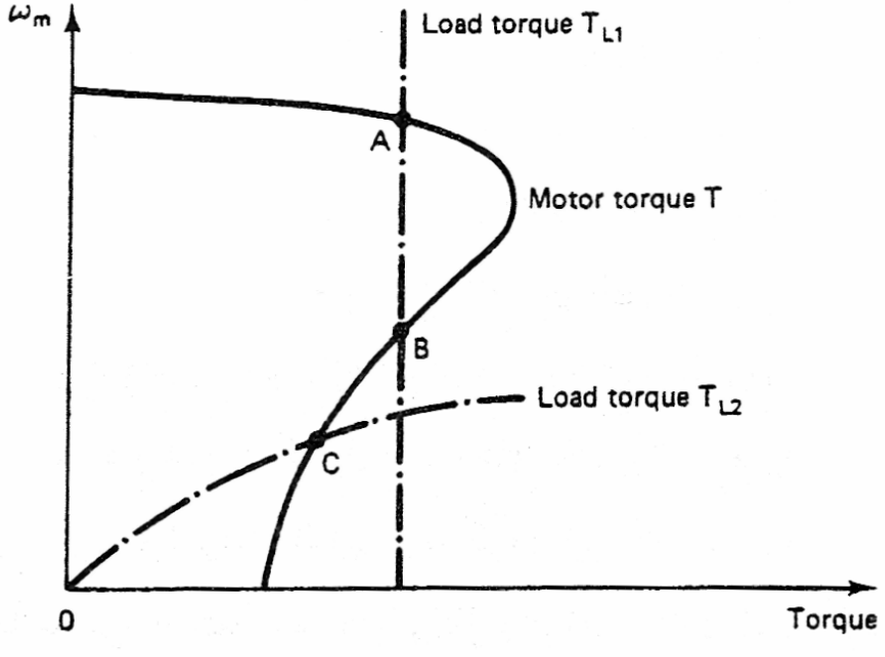
$$\Delta\omega_m(t) = (\Delta\omega_m)_o\, e^{-\frac{1}{J}\left[\frac{dT_l}{d\omega_m} - \frac{dT}{d\omega_m}\right]t} \qquad (۱۴)$$

شرط پایداری نقطه تعادل: (۱۵)

$$\left(\frac{dT_l}{d\omega_m} - \frac{dT}{d\omega_m}\right) > 0$$

✓ 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.



پایداری حالت دائمی نقاط تعادل

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

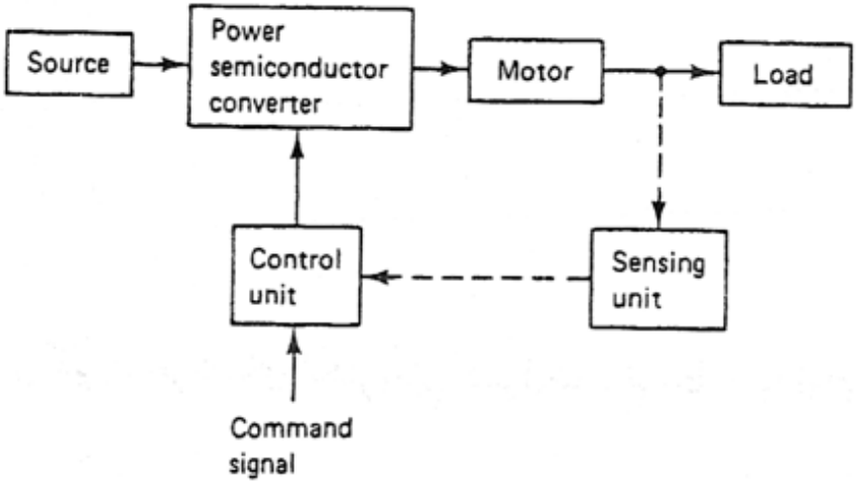
۱- درایوهای با کنترل حلقه باز: از کمیت تحت کنترلی هیچ فیدبکی گرفته نمی شود.

۲- درایوهای با کنترل حلقه بسته: سیستم کنترل بصورت حلقه بسته است و بوسیله سنسورها یک یا چند فیدبک از موتور - بار گرفته می شود.

۳- درایو با کنترل حلقه بسته سنسورلس: سیستم کنترل بصورت حلقه بسته است اما فیدبک با سنسور اندازه گیری نشده و تخمین زده می شود.

➢ انواع سنسورهای مورد استفاده در درایوها

- ✓ همانطور که قبلا در ابتدای درس گفته شد، درایو یک سیستم کنترل حلقه بسته با فیدبک منفی است که فیدبکهای مورد نیاز توسط سنسورها اندازه گیری می شوند.
- ✓ 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 صرفا مانیتورینگ و یا حفاظتی (مثل سنسور دما) نیستند.



بلوک دیاگرام کلی درایو الکتریکی

❖ انواع سنسور مورد استفاده در درایوهای الکتریکی

۱- سنسور جریان

۲- سنسور ولتاژ

۳- سنسور شار

٤- سنسور سرعت

٥- سنسور موقعیت

٦- سنسور گشتاور

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

✓ سنسور جریان تقریبا کلیدی ترین سنسور در کل درایوهای الکتریکی است و تقریبا 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

٤- جهت تخمین مقادیر کمیتهایی نظیر سرعت، شار و گشتاور

❖ تکنیک های مختلف بکار رفته در سنسورهای جریان

۱- اندازه گیری جریان موتور در درایو با استفاده از ترانس جریان (CT) – منسوخ شده

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)

❑ 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.

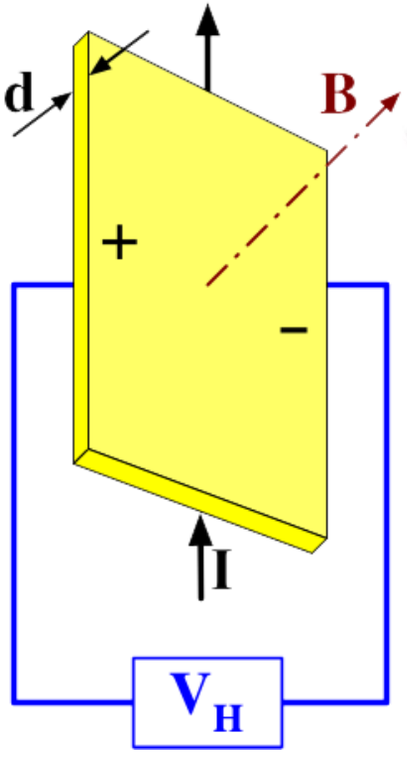
٤- انحراف مقدار مقاومت بواسطه حرارت ایجاد شده در آن

٥- دقت نامطلوب برای کارهای کنترلی حلقه بسته دقیق

➢ سنسور جریان اثر هال: معرفی اثر هال

- ✓ پدیده یا اثر هال در سال ۱۸۷۹ به وسیلهٔ ادوین هربرت هال در حالی که داشت روی رساله دکترای خود در دانشگاه جان هاپکینز در امریکا کار می‌کرد، کشف گردید.
- ✓ اثر هال نتیجهٔ 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 (الکترون‌ها) در آن وجود دارد، ولتاژ هال (V_H)، به صورت زیر بدست می‌آید:

$$V_H = \frac{-IB}{dne}$$



- ✓ که در آن I جریان عبوری از طول صفحه، B چگالی شار مغناطیسی، d عمق صفحه، e بار الکتریکی الکترون و n چگالی حامل‌های بار الکتریکی است.

❖ ویژگی های سنسورهای اثر هال

۱- ایزولاسیون عالی مدار قدرت از مدار کنترل

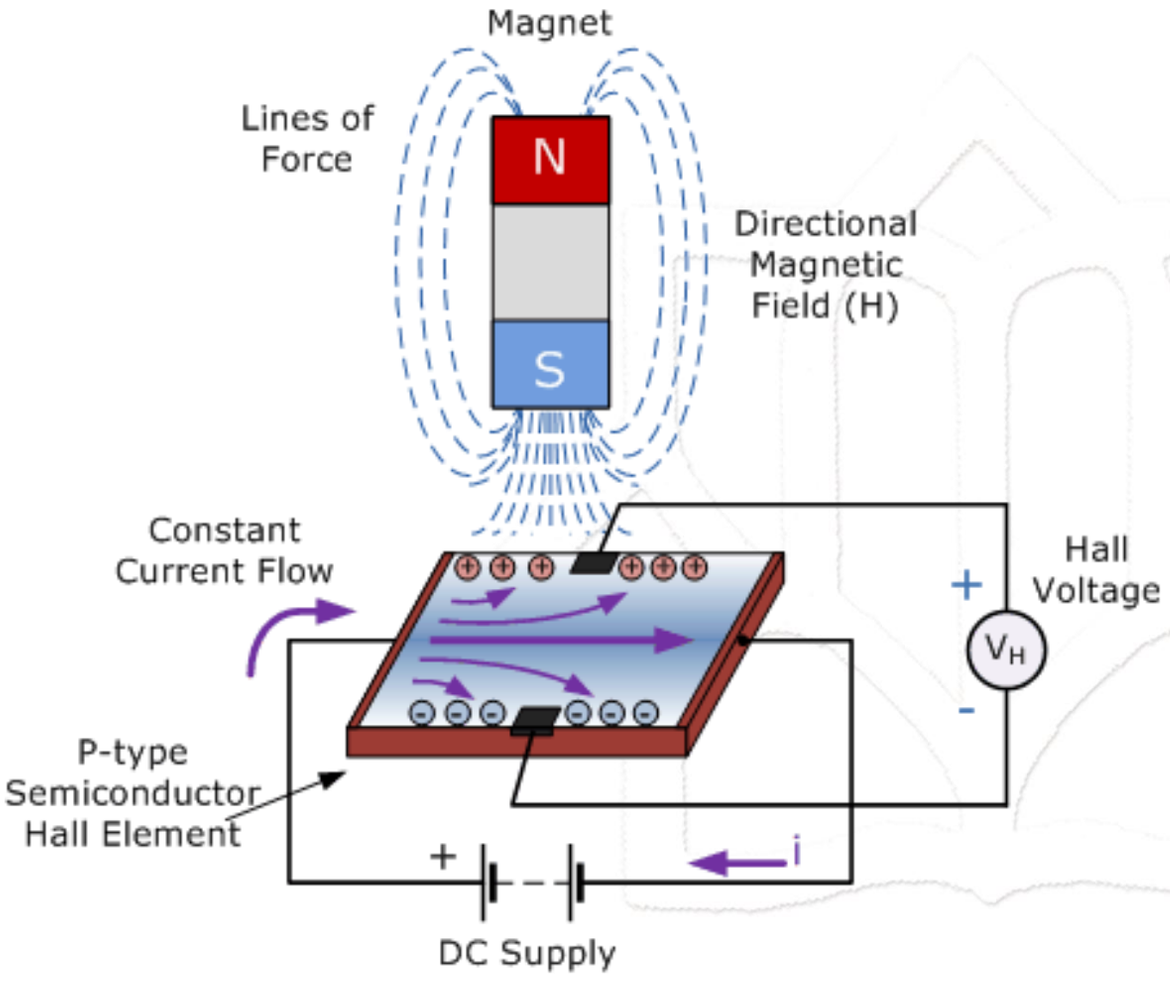
۲- خطی بودن در بازه وسیع

۳- پهنای باند زیاد از DC تا ۱۵۰ kHz

٤- دقت و حساسیت بالا

٥- خطای دریفت حرارتی پایین

٦- پاسخ زمانی سریع



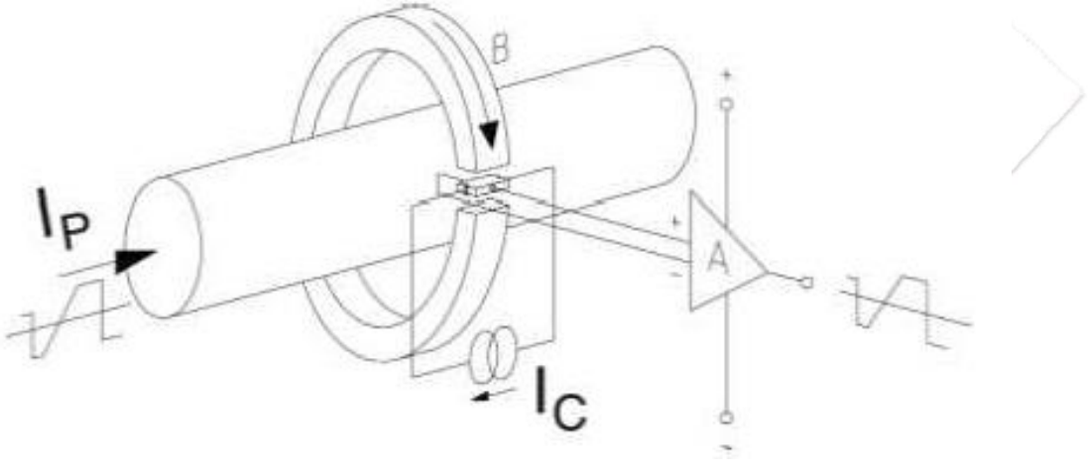
❖ کاربردهای سنسورهای اثر هال

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، ...

➢ سنسور جریان اثر هال: طرح حلقه باز

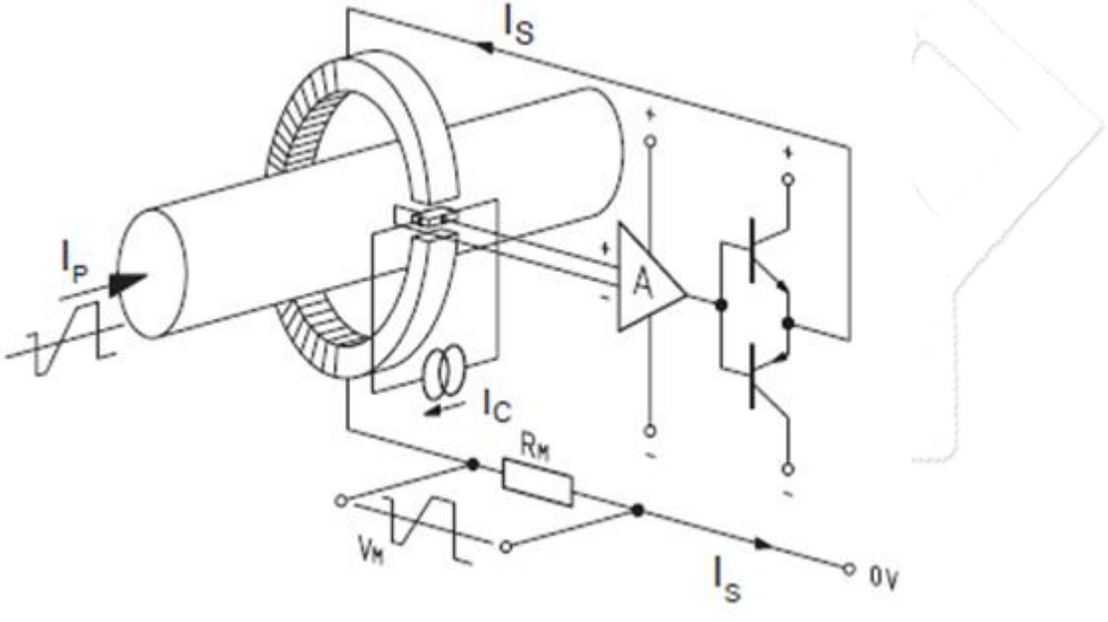
- ✓ در کاربردهای با خروجی خطی، سنسورهای اثر هال از دو طرح حلقه باز و حلقه بسته می توان استفاده نمود.
- ✓ در طرح حلقه باز، عبور جریان از مرکز هسته آهنی سبب القای شار در هسته شده که این شار عمود بر قطعه اثر هال واقع است. به دلیل پدیده اثر هال ولتاژی در دو سر دیگر این قطعه ایجاد می گردد که پس از تقویت به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

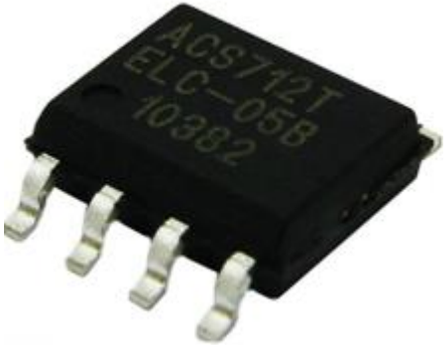
➢ سنسور جریان اثر هال: طرح حلقه بسته

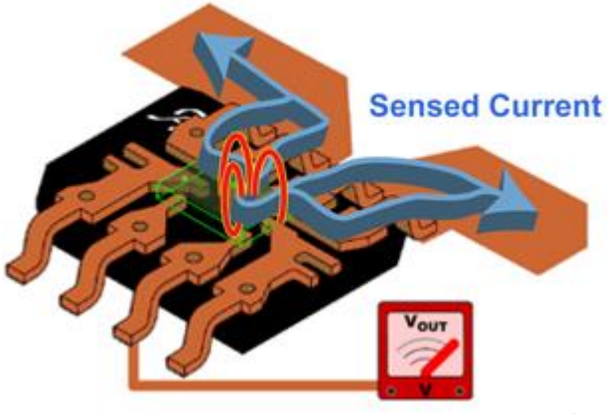
- ✓ در طرح حلقه بسته سنسورهای اثر هال نیز ازیک سیم پیچ بر روی هسته مغناطیسی استفاده می شود تا میدانی هم اندازه میدان ناشی از جریان ورودی ولی مخالف جهت اولیه ایجاد شود.
- ✓ مدار المان هال و تقویت کننده آن به شکلی است که میدان مغناطیسی داخل هسته همیشه در حد صفر می باشد. با افزایش جریان ورودی، میدان مغناطیسی 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.

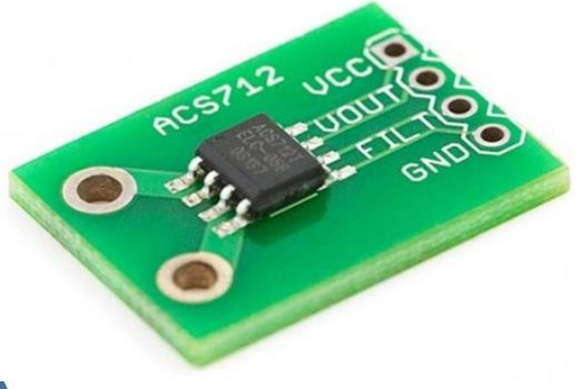


(ب) طرح حلقه بسته اندازه گیری جریان در مبدل اثر هال

➢ سنسور جریان اثر هال: سنسور ACS712







- ✓ آی سی های سری ACS712 سنسور جریان اثرهال 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 SMDاست.
- ✓ نحوه عملکرد بدین صورت می‌باشد که جریان از پایه مورد نظر آن عبور می‌کند 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 می‌توان 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 می‌باشد.
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 ٦٦ تا ۱۸۵ میلی ولت بر آمپر
8) عدم هیسترزیس مغناطیسی ، حدود صفر

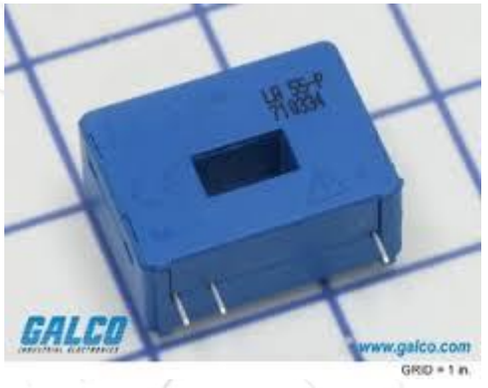
❑ سنسورها در درایوهای الکتریکی

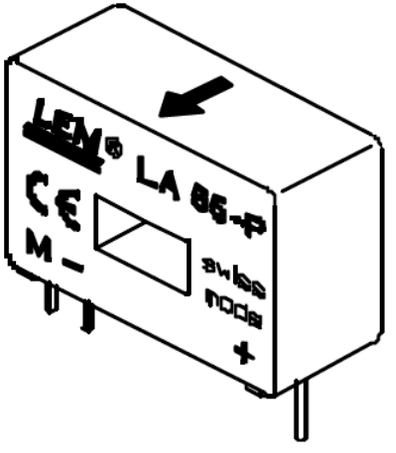
➢ سنسور جریان اثر هال: سنسورهای شرکت LEM

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

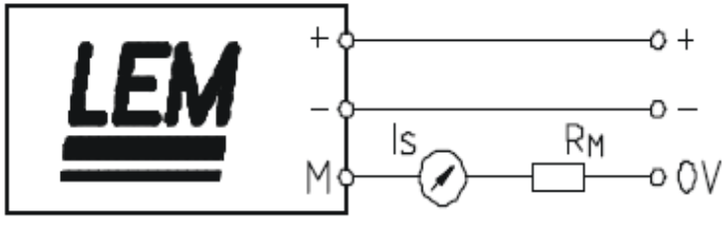
Electrical data

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°C		T_A = 85°C			
			$R_{M\,min}$	$R_{M\,max}$	$R_{M\,min}$	$R_{M\,max}$		
	with ± 12 V	@ ± 50 A $_{max}$	0	215	0	210	Ω	
		@ ± 100 A $_{max}$	0	35	0	30	Ω	
	with ± 15 V	@ ± 50 A $_{max}$	0	335	30	330	Ω	
		@ ± 100 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 (± 5 %)			± 12 .. 15				V
I_C	Current consumption			10 (@ ± 15V) + I_S				mA
V_d	R.m.s. voltage for AC isolation test, 50 Hz, 1 mn			2.5				kV

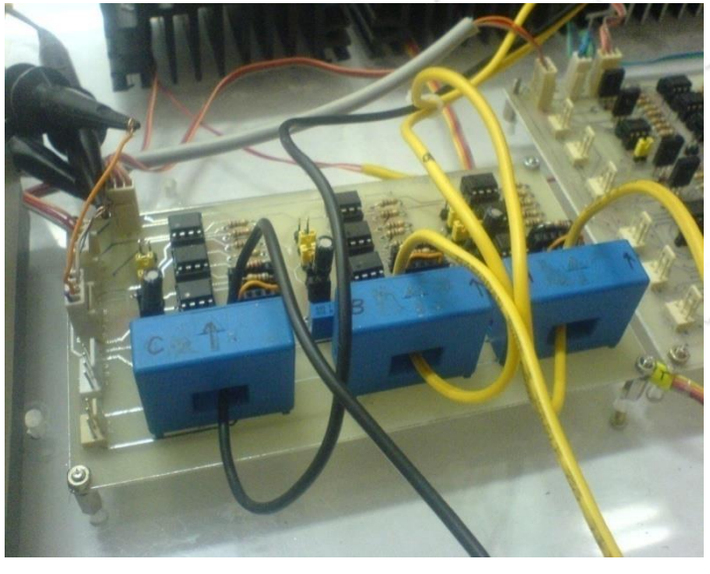




(الف) سنسور جریان اثر هال مدل LA 55-P



(ب) اتصالات سنسور جریان اثر هال



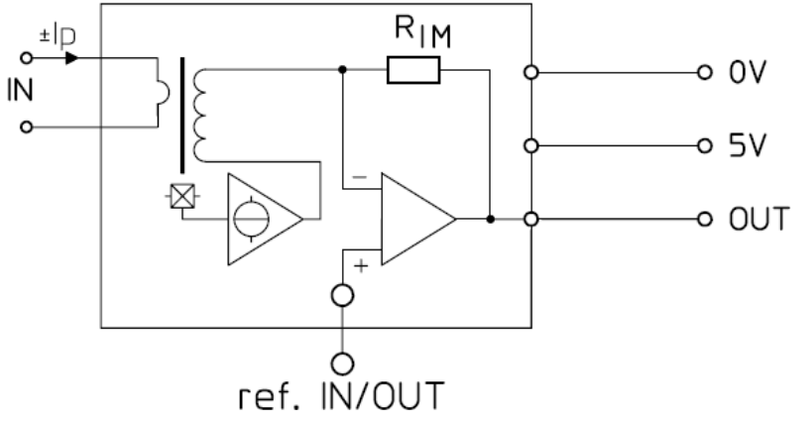
(ج) استفاده از سه سنسور جریان اثر هال در مدار واقعی برای اندازه گیری جریان سه فاز موتور

Current Transducer LTSR 6-NP

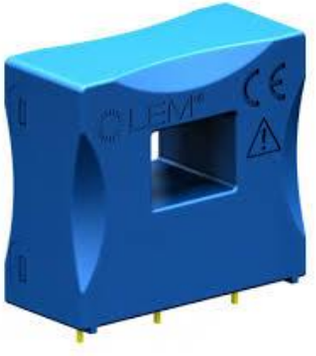
Electrical data

I_{PN}	Primary nominal current rms		6	At
I_{PM}	Primary current, measuring range		0 .. ± 19.2 [1]	At
$\hat{I}_P$	Overload capability		250	At
V_{OUT}	Output voltage (Analog) @ I_P		2.5 ± (0.625·I_P/I_{PN})	V
	I_P = 0		2.5 [2]	V
V_{REF}	Reference voltage (internal reference), Ref_{OUT} mode		2.5 [3]	V
	Reference voltage (external reference), Ref_{IN} mode		1.9 .. 2.7 [4]	V
G	Sensitivity		104.16	mV/A
N_S	Number of secondary turns (± 0.1 %)		2000	
R_L	Load resistance		≥ 2	kΩ
$C_{L\,max}$	Maximum capacitive loading		500	pF
R_{IM}	Internal measuring resistance (± 0.5 %)		208.33	Ω
TCR_{IM}	Temperature coefficient of R_{IM}		< 50	ppm/K
V_C	Supply voltage (± 5 %)		5	V
I_C	Current consumption @ V_C = 5 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

❖ تکنیک های مختلف بکار رفته در سنسورهای ولتاژ:

۱- اندازه گیری جریان با استفاده مقسم مقاومتی

۲- اندازه گیری 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:**

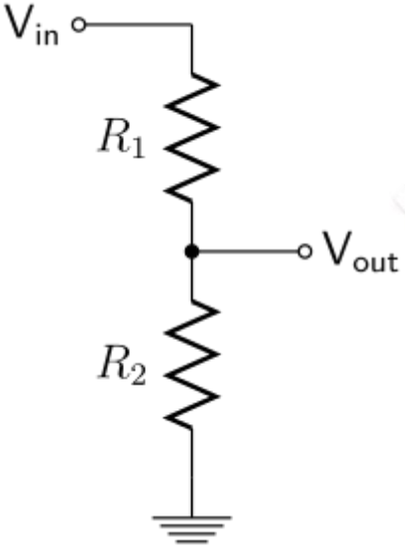
۱- نیازمند مدار ایزولاسیون جداگانه

۲- قیمت پائین

۳- دقت مناسب

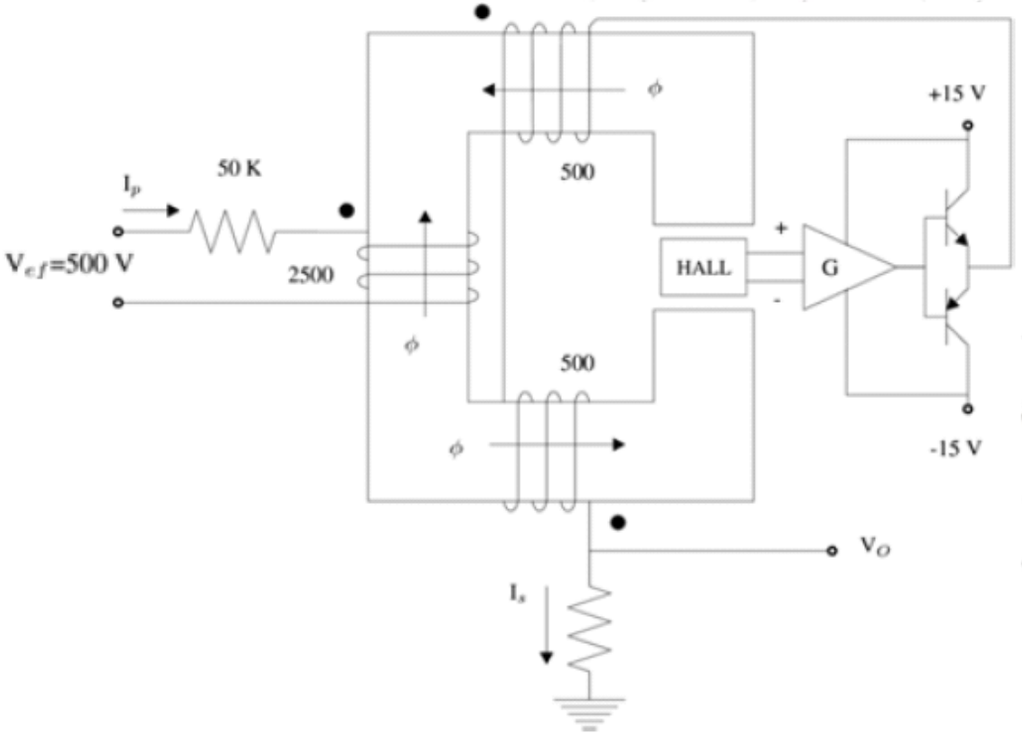
٤- خطای اندازه گیری ناشی از تغییرات مقاومتها بعلت افزایش دما

٥- اثر بارگذاری طبقات بعدی



➢ سنسور ولتاژ: سنسور ولتاژ اثر هال

- ✓ 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 شد 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، Nدور 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 مستقیما به سنسور وصل نمود.

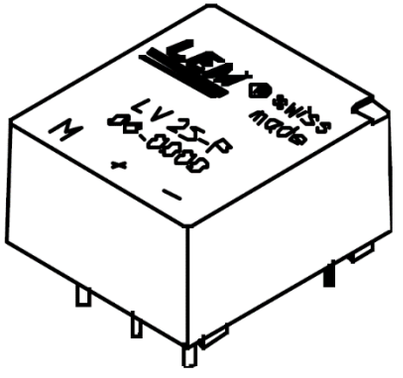


شماتیک داخلی سنسور ولتاژ اثر هال

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

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

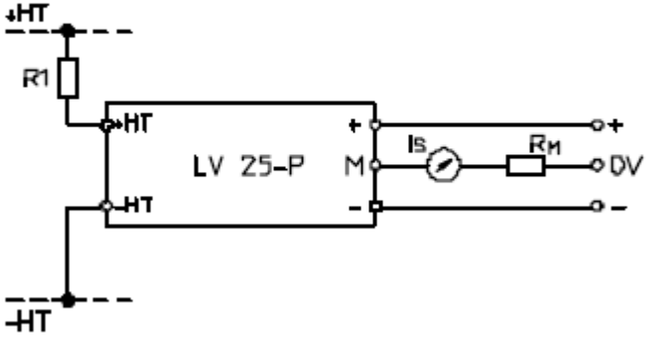
Voltage Transducer LV 25-P



Electrical data

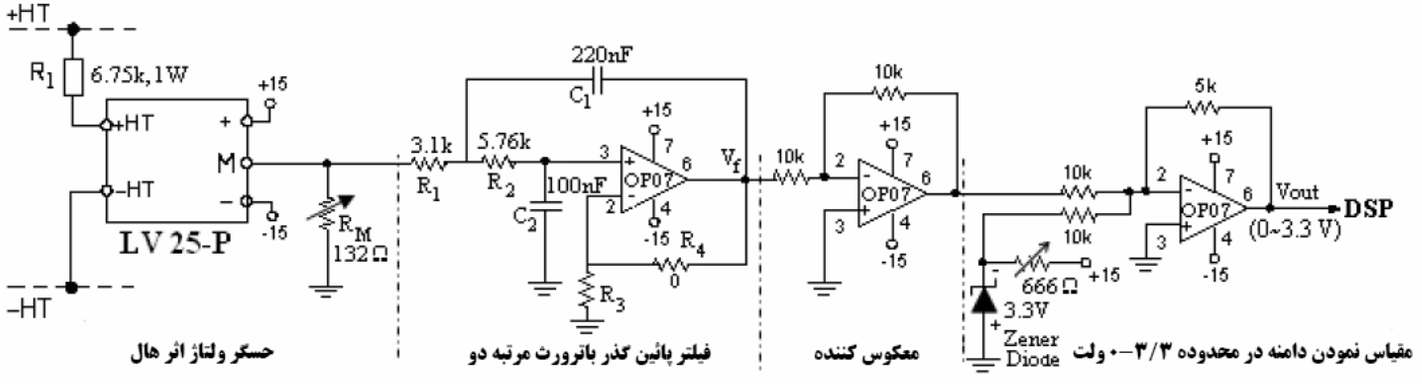
I_{PN}	Primary nominal r.m.s. current		10		mA
I_P	Primary current, measuring range		0 .. ± 14		mA
R_M	Measuring resistance		R_{Mmin}	R_{Mmax}	
	with ± 12 V	@ ± 10 mA_{max}	30	190	Ω
		@ ± 14 mA_{max}	30	100	Ω
	with ± 15 V	@ ± 10 mA_{max}	100	350	Ω
		@ ± 14 mA_{max}	100	190	Ω
I_{SN}	Secondary nominal r.m.s.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

Connection

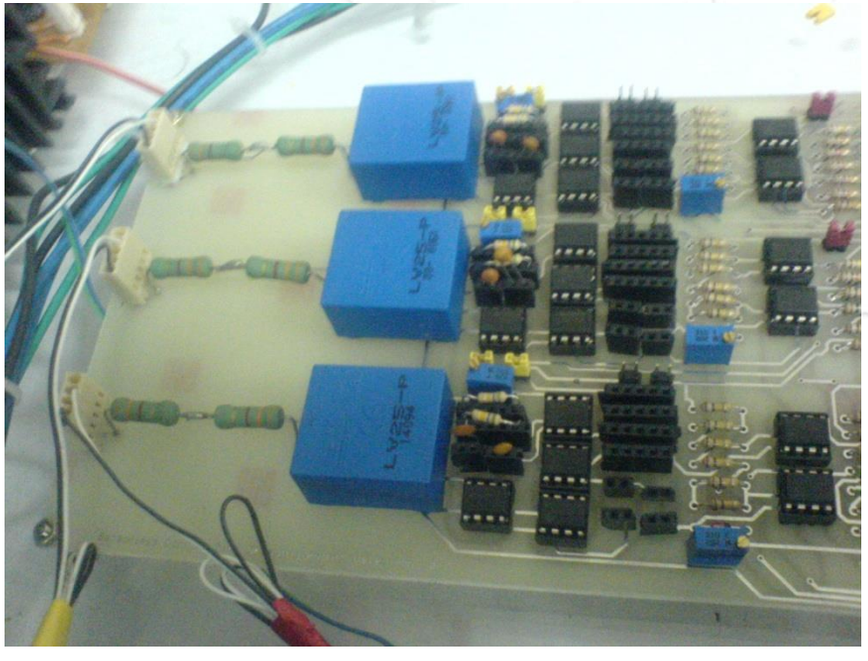


➢ سنسور ولتاژ: سنسور ولتاژ اثر هال LV-25 شرکت LEM

- ✓ **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 (۸–۵): مدار حسگر ولتاژ



✓ سنسور سرعت نیز یکی از سنسورهای اصلی مورد استفاده در درایوهای الکتریکی است که معمولا 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:**

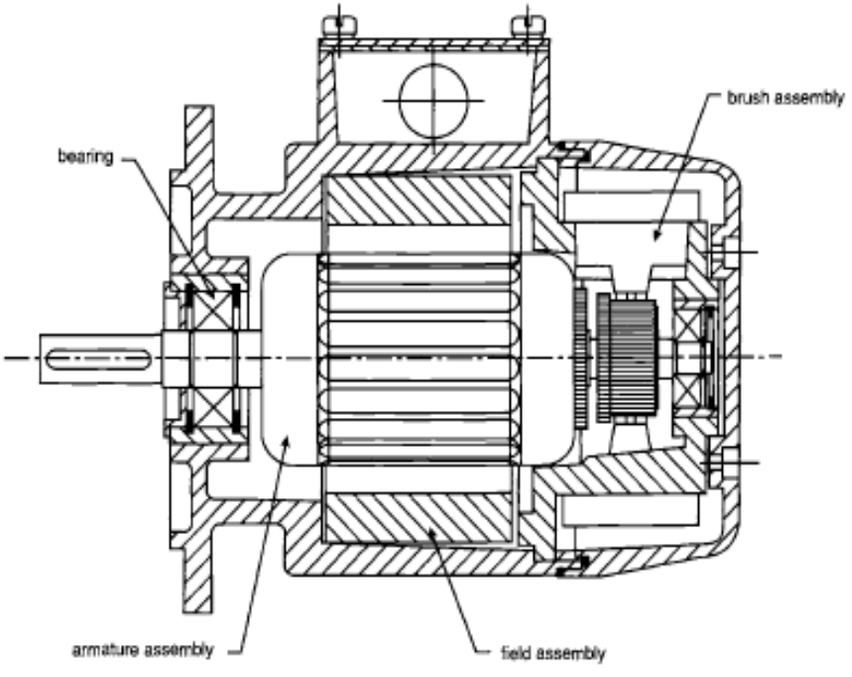
۱- تاکومترهای DC و AC

۲- شافت اینکودرهای نوری

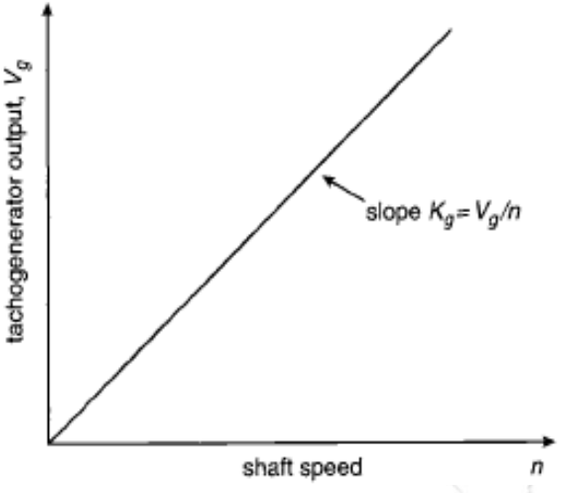
❑ سنسورها در درایوهای الکتریکی

➢ سنسور سرعت: تاکومتر

- ✓ تاکومتر در واقع یک ژنراتور DC یا AC است.
- ✓ تاکومتر نوع DC به دلیل سادگی و عدم نیاز به مدارات مکمل، کاربرد بیشتری دارد.



(الف) شماتیک یک تاکومتر DC



(ب) رابطه ولتاژ و سرعت یک تاکومتر

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

❑ سنسورها در درایوهای الکتریکی

➢ **سنسور سرعت: یک نمونه تاکومتر DC از شرکت Hubner**

HÜBNER
BERLIN

GT 5 · GTL 5
DC-Tachos
DC Tachogenerators

❖ **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.

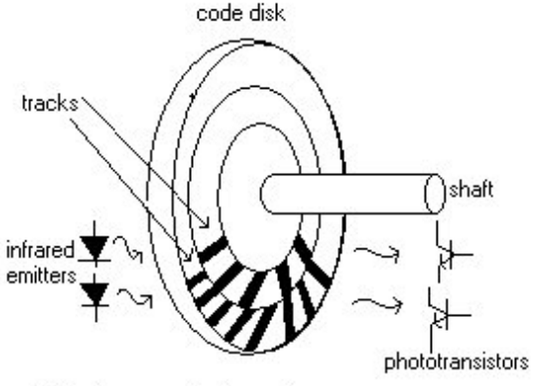


Fig 1. A rotary optical encoder

❖ **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:**

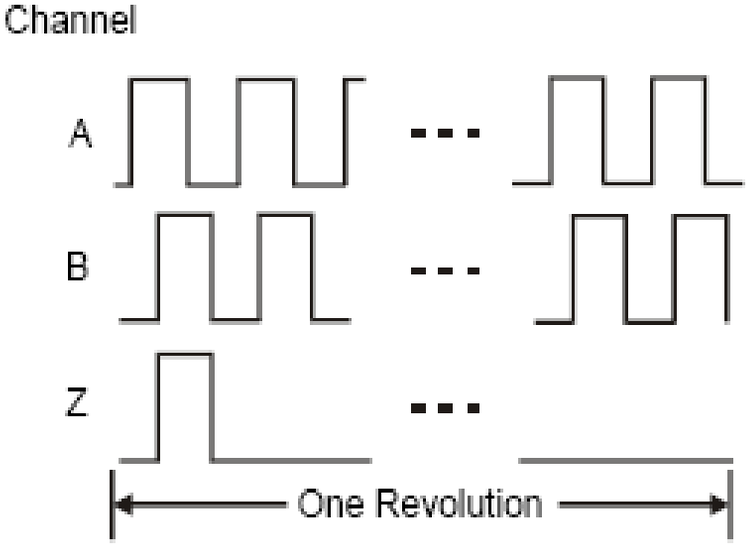
۱- اینکودرهای افزایشی (Incremental encoders)

۲- اینکودرهای مطلق (Absolute encoders)

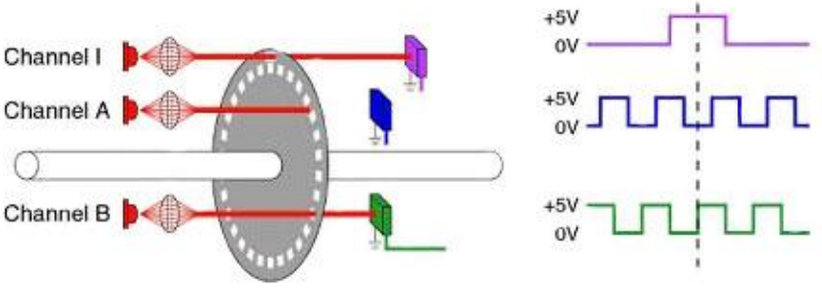
نمونه هایی از اینکودرهای نوری

✓ **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.**

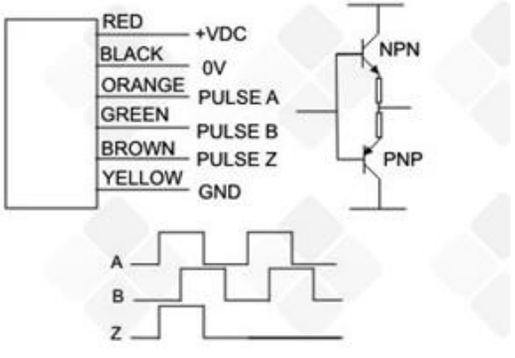
$$\text{Pulse Frequency (Hz)} = \frac{\text{Speed (rpm)} \times \text{Resolution (PPR)}}{60}$$



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



(الف) شماتیک کلی یک اینکودر افزایش دو کاناله

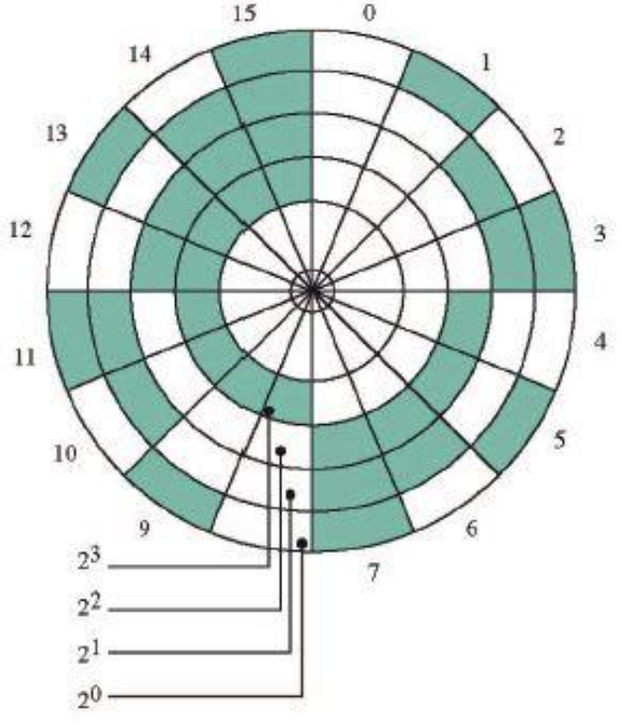


(ج) پین های خروجی اینکودر افزایشی دو کاناله

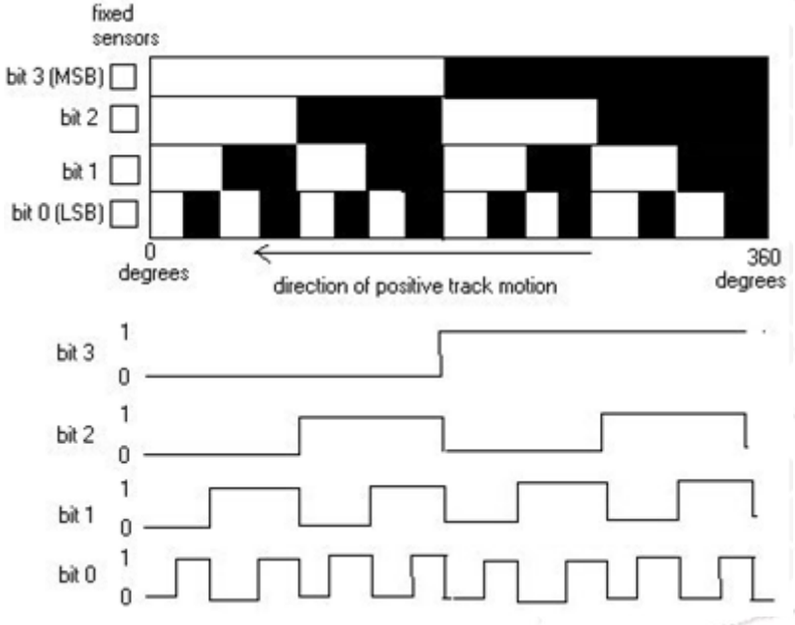
✓ **از تعیین موقعیت قطار پالس A و B نسبت به یکدیگر جهت چرخش روتور بدست می آید.**

✓ **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 برحسب مقدار زاویه چرخش، مقدار عدد سه بیتی بزرگتر می شود. با داشتن زمان چرخش، سرعت محور قابل محاسبه است.**



(الف) صفحه دورانی اینکودرهای باینری ٤ بیتی



(ب) الگوی کدگذاری بصورت باینری در اینکودرهای مطلق ٤ بیتی

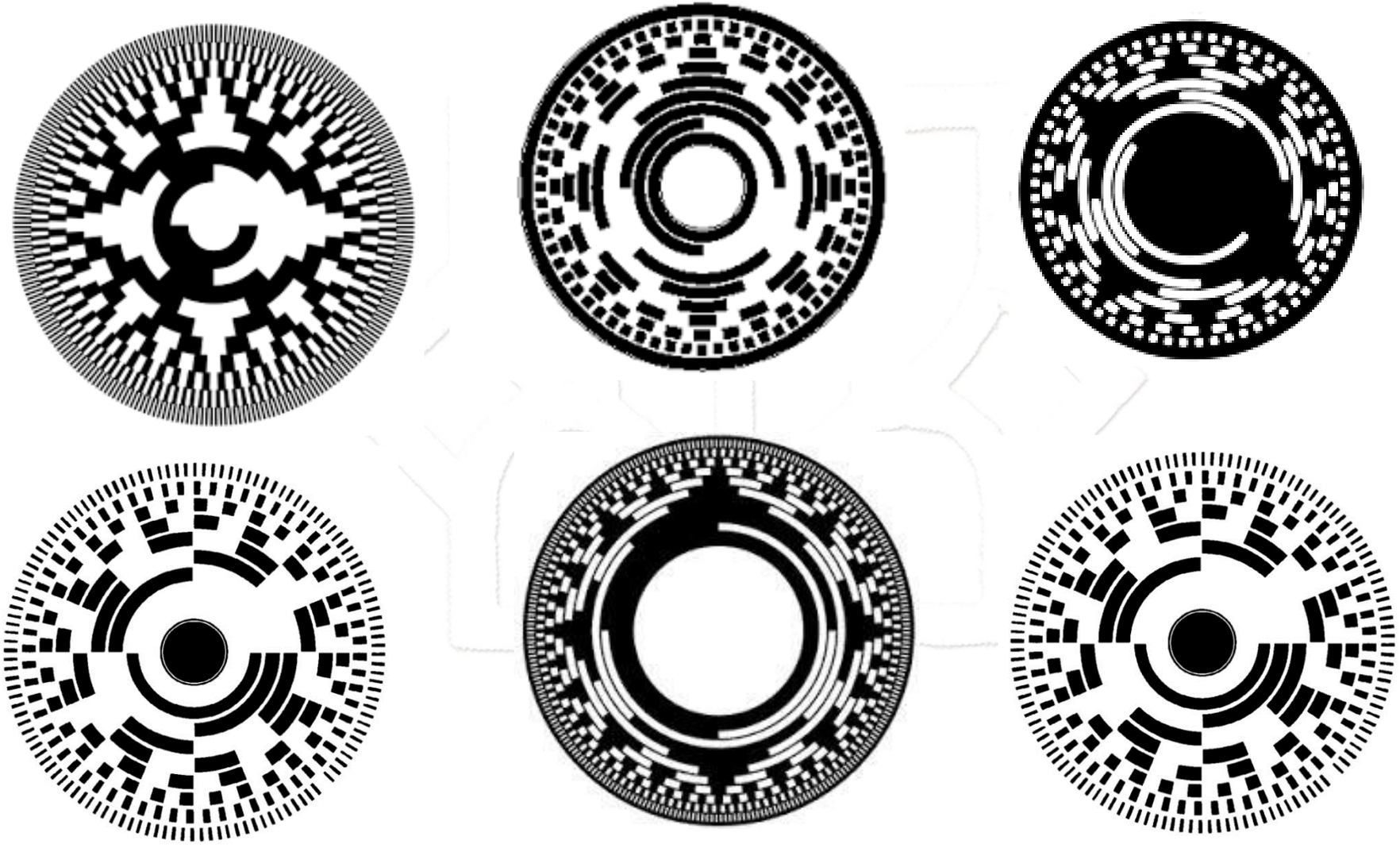
✓ **بیتهای خروجی می توانند بصورت باینری و یا کد گری (Gray) کد شده باشند.**

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

❑ سنسورها در درایوهای الکتریکی

➢ سنسور سرعت: اینکودر نوری

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



➢ سنسور موقعیت

✓ 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.

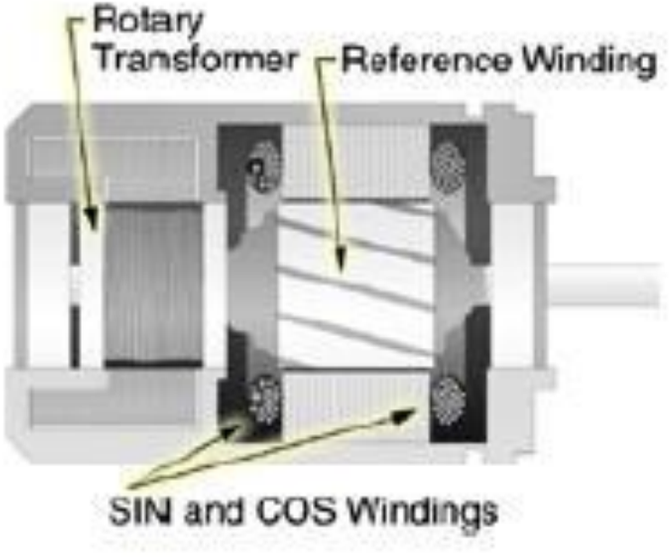
✓ لذا در ادامه فقط به بررسی رزولورها پرداخته می شود.

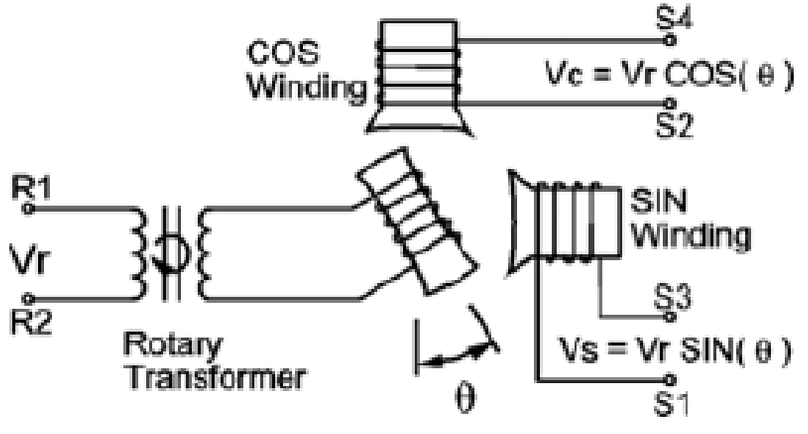
➢ سنسور موقعیت: رزولور

✓ 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 پیچی عمود بر هم وجود دارد. با تحریک سیم پیچی روتور ، در سیم پیچهای استاتور ولتاژی متناسب با سینوس زاویه میان روتور و استاتور ایجاد می گردد.





$$Vc = Vr\cos\theta$$
$$Vs = Vr\sin\theta$$

❑ سنسورها در درایوهای الکتریکی

➢ سنسور گشتاور

- ✓ سنسور گشتاور یکی از سنسورهای فرعی مورد استفاده در درایوهای الکتریکی است که اغلب درکنترل حلقه بسته گشتاورمورد استفاده قرار می گیرد.
- ✓ این سنسور یکی از گرانترین سنسورهای مورد استفاده در درایوهای الکتریکی که موارد استفاده صنعتی و تجاری آن بسیار معدود 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:**

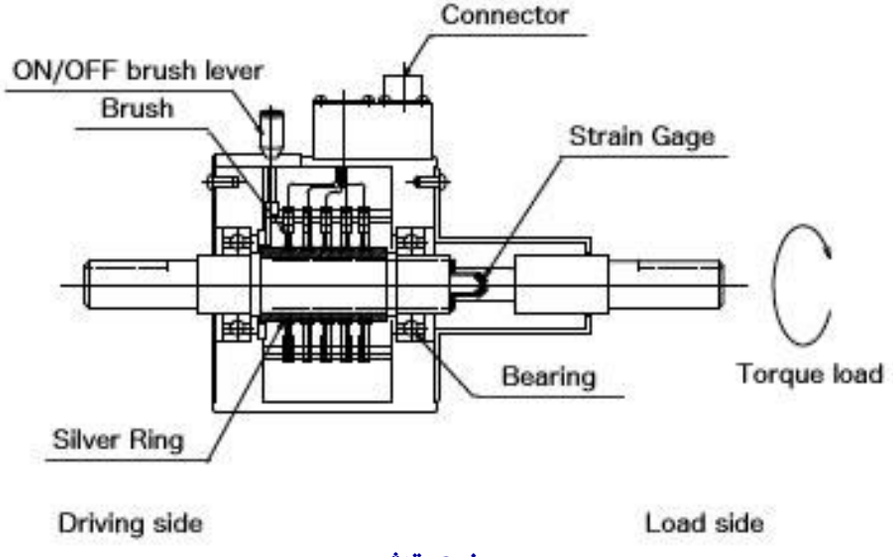
۱- برمبنای تنش مکانیکی و استفاده از حسگرهای پیزو و استرین گیج

۲- برمبنای گشتاور ایجاد شده در میدان مغناطیسی

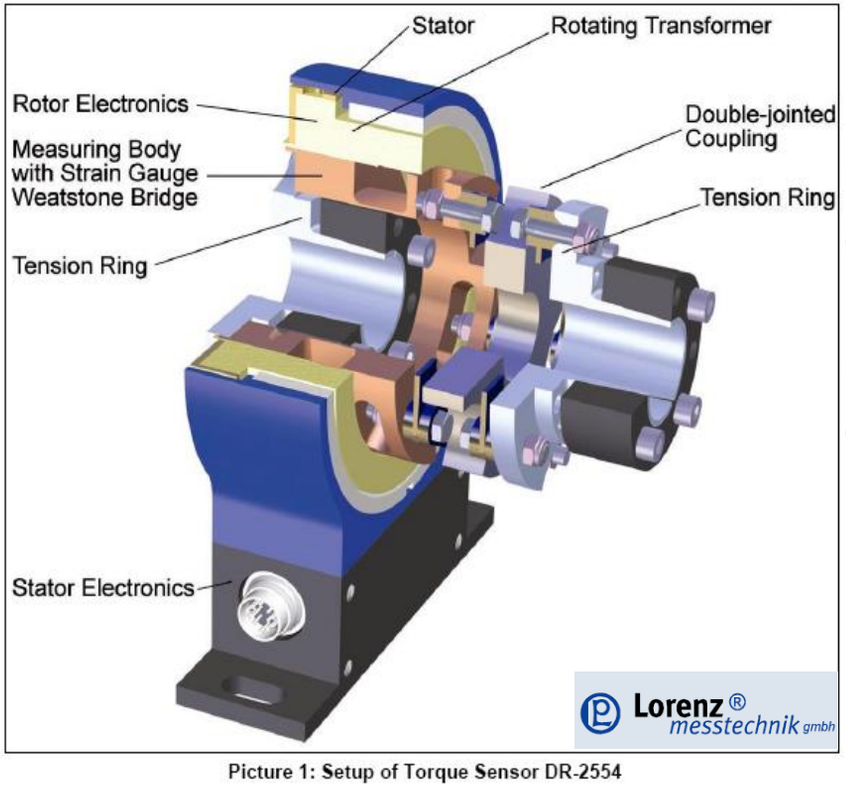
- ✓ سنسور گشتاور مانند سنسورهای سرعت و موقعیت با محور موتور کوپل شده، اما از دو طرف با محورهای بار و موتور در ارتباط است.
- ✓ به دلیل گران بودن این سنسور کاربرد صنعتی اش محدود بوده و در درایوهایی که نیازمند فیدبک گشتاور است، مقدار آنرا تخمین می زنند.

❑ سنسورها در درایوهای الکتریکی

➢ سنسور گشتاور: انواع



نوع تنشی



Picture 1: Setup of Torque Sensor DR-2554

➢ کنترل حلقه بسته به روش بدون سنسور (Sensorless)

- ✓ 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 مستقیما 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.
- ✓ اخیرا 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 روئیتگرهای 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.

❑ کنترل کننده ها در درایوهای الکتریکی

✓ **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

eZdspTM R2812 for TMS320R2812 + Power Supply + CCS for C28xx