



کنترل محرکه های الکتریکی

فصل ۴:

محرکه موتورهای DC جاروبکدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر

دانشکده فنی

گروه برق

حسن علیپور

ساختار اصلی

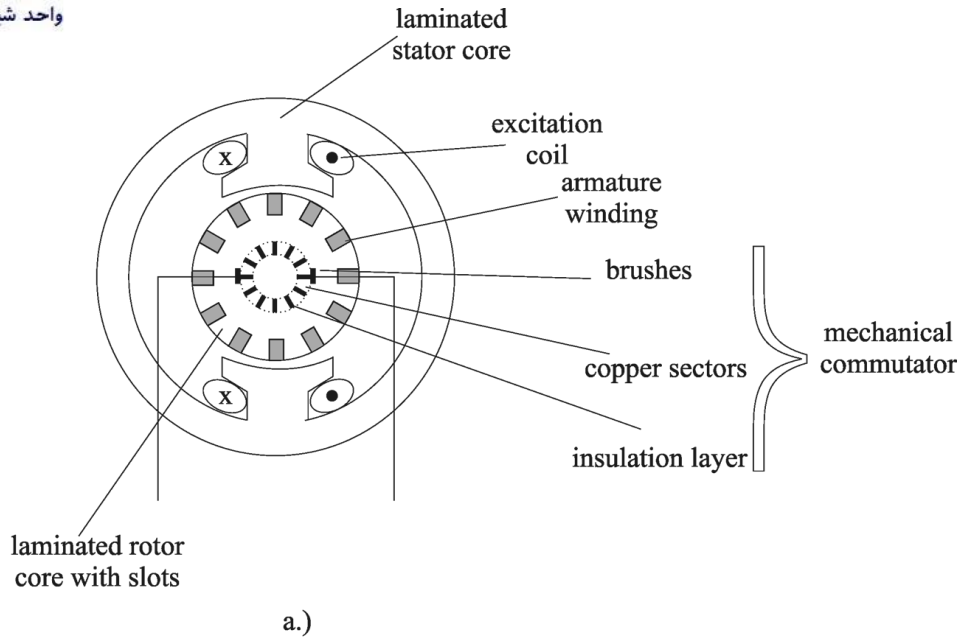
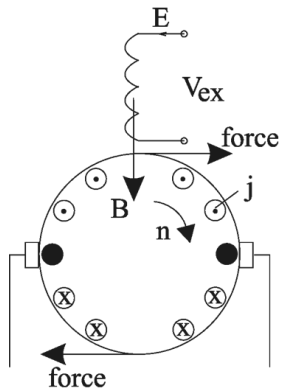
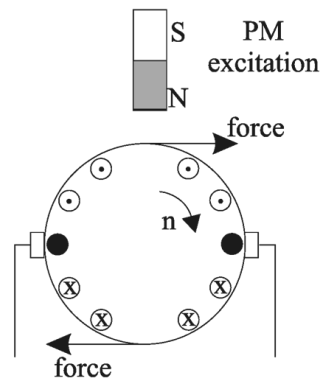


Figure 4.1. Cylindrical DC brush motor;

- a) Topology,
- b) Schematics with electromagnetic excitation,
- c) Schematics with permanent magnets (PMs)



b.)



c.)

ساختار اصلی

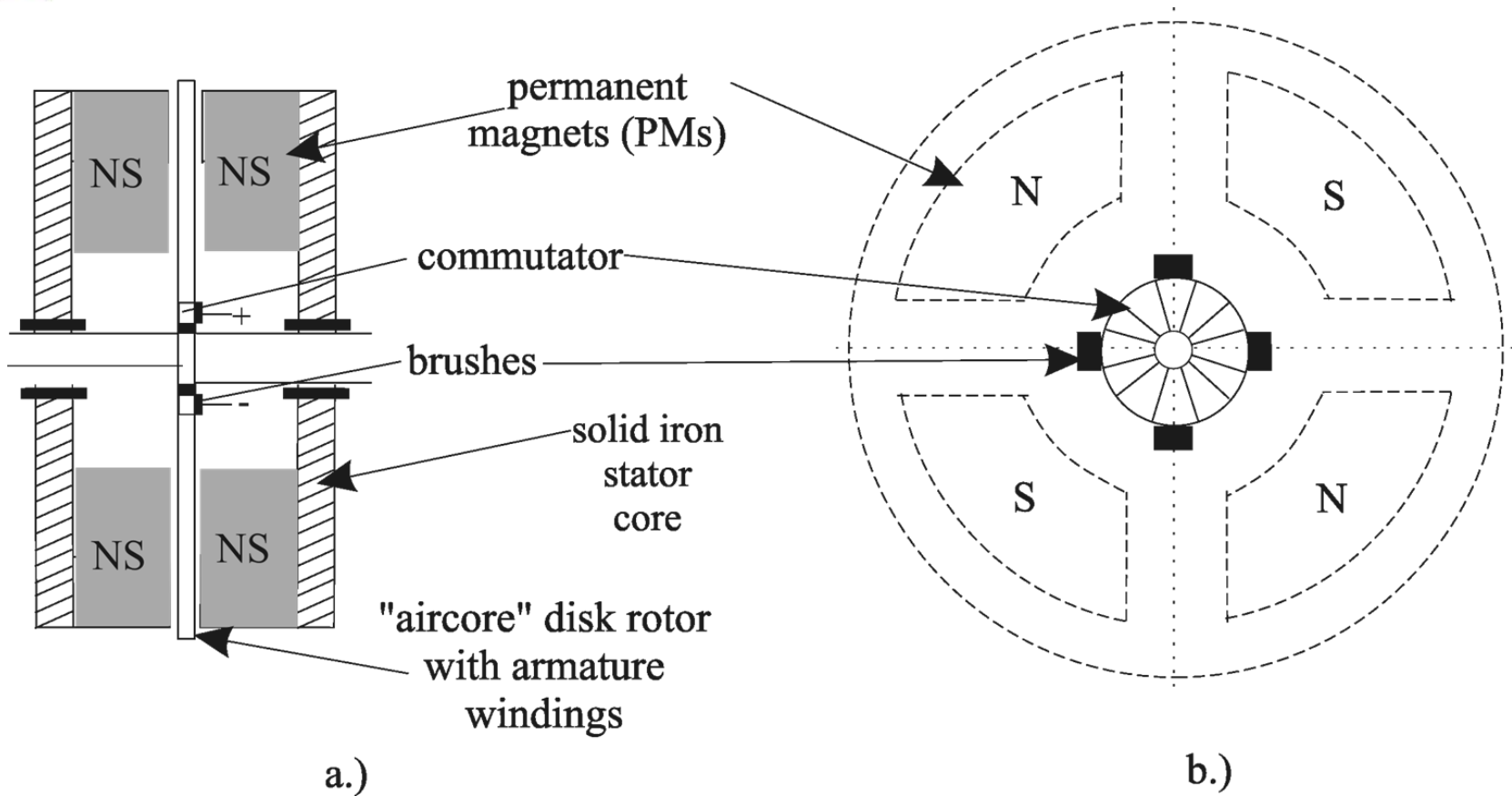


Figure 4.2. Disk DC brush motor ($2p = 4$ poles); a) cross section, b) axial view



ولتاژ القایی حرکتی (EMF)

❖ ولتاژ القایی حرکتی در روتور:

❖ n : سرعت روتور

❖ λ_p : شار پیوندی هر قطب

❖ N : تعداد هادی ها

❖ a : تعداد مسیرهای موازی جریان

❖ p : تعداد جفت قطبها

❖ B_{gav} : متوسط چگالی شار در فاصله هوایی هر قطب

❖ τ : گام قطب

❖ L : طول هسته

$$E = K_e \cdot n \cdot \lambda_p; \quad K_e = \frac{p}{a} \cdot N$$

$$\lambda_p = B_{gav} \cdot \tau \cdot L$$

معادلات D-Q ماشین DC

- ❖ در ماشین dc جاروبکدار، در حالت ایده آل بین میدان مغناطیسی استاتور و میدان روتور ۹۰ درجه الکتریکی اختلاف زاویه مکانی وجود دارد. بنابراین، با صرف نظر کردن از اشباع، هیچگونه برهمکنش (ولتاژ القایی ترانسفورماتوری) بین سیم بندی های آرمیچر و تحریک وجود نخواهد داشت. می توان جریان سیم بندی تحریک را جریان شارساز و جریان سیم بندی آرمیچر را جریان تولید کننده گشتاور در نظر گرفت. از اینرو در ماشین dc با تحریک جداگانه کنترل جریان شارساز و گشتاور ساز به طور مستقل امکانپذیر است.
- ❖ برهمکنش بین مدار روتور و استاتور تنها از طریق ولتاژ حرکتی برقرار است و معادلات فضای حالت موتور dc جاروبکدار به صورت زیر است:

$$V_{ex} = R_e \cdot i_e + L_e \cdot \frac{di_e}{dt}$$

$$V_a = R_a \cdot i_a + E + L_a \cdot \frac{di_a}{dt}$$



معادلات D-Q ماشین DC

❖ در صورت عدم وجود اشباع:

❖ G: اندوکتانس متعامد بین مدار روتور و تحریک ناشی از حرکت

❖ T_e : گشتاور الکترومغناطیسی

❖ P_e : توان الکترومغناطیسی

$$\lambda_p = G \cdot i_e$$

$$T_e = \frac{P_e}{2\pi n}; \quad P_e = E \cdot i_a$$

$$T_e = \frac{E \cdot i_a}{2\pi n} = \frac{K_e}{2\pi} \cdot \lambda_p \cdot i_a$$

$$J2\pi \cdot \frac{dn}{dt} = T_e - T_{load} - B \cdot n; \quad \frac{d\theta_r}{dt} = 2\pi n$$



مشخصات حالت ماندگار موتور DC

❖ حالت ماندگار به معنی وجود سرعت ثابت و جریان ثابت است.
($dn/dt = 0$), ($i_e = cte$, $i_a = cte$.)

$$V_{ex} = R_e \cdot i_e$$

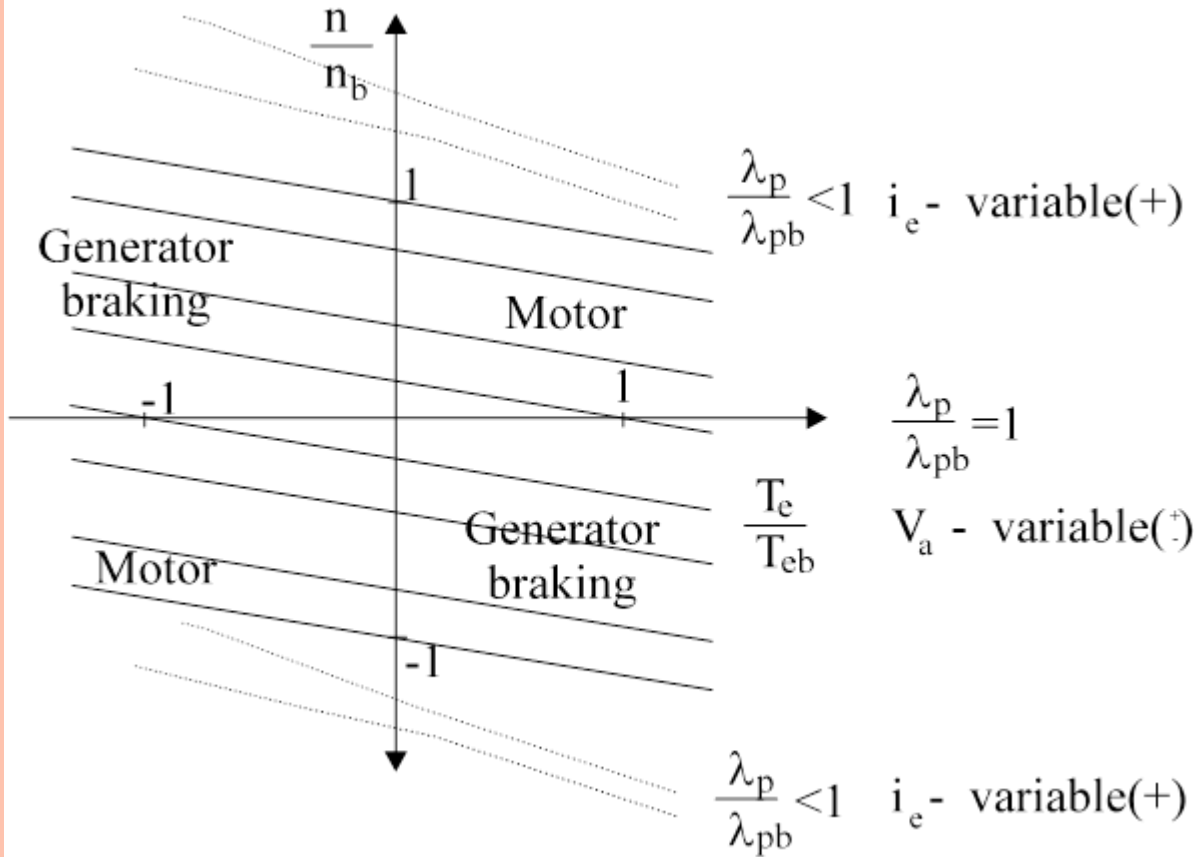
$$V_a = R_a \cdot i_a + K_e \cdot n \cdot \lambda_p$$

$$T_e = \frac{K_e}{2\pi} \cdot \lambda_p \cdot i_a = T_{load} + B \cdot n$$

$$V_a = K_e \cdot n \cdot \lambda_p + R_a \cdot \frac{T_e \cdot 2\pi}{K_e \cdot \lambda_p}$$

❖ بنابراین، تنظیم سرعت از طریق کنترل ولتاژ V_a و کنترل شار λ_p امکان پذیر است.

مشخصات حالت ماندگار موتور DC



-منحنی های گشتاور-
 سرعت ماشین dc در
 روشهای کنترل ولتاژ
 ارمیچر و شار خطوط
 مستقیم می باشند.

-در حالت کلی کنترل
 سرعت در ناحیه توان
 ثابت از سرعت نامی
 (مبنا) تا سرعت ۲ یا ۳
 برابر آن انجام می شود.

Figure 4.3. The torque / speed curves for variable speed



عملکرد حالت گذرای موتور DC در شار ثابت

❖ شار ثابت به معنی ثابت بودن جریان تحریک است. ($\lambda_p = \text{cte.}$) $di_e/dt = 0$

$$T_e = \frac{K_e}{2\pi} \cdot \lambda_p \cdot i_a = K_T \cdot i_a$$

$$E = K_e \cdot \lambda_p \cdot n = K_E \cdot n; \quad K_T = \frac{K_e \cdot \lambda_p}{2\pi} = \frac{K_E}{2\pi}$$

❖ به K_T ثابت گشتاور بر جریان گفته می شود. این متغیر در صورت عدم اشباع مغناطیسی یا ثابت بودن سطح اشباع، مقداری ثابت است.

$$V_a = R_a \cdot i_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + K_E n$$

$$2\pi J \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{K_E}{2\pi} \cdot i_a - T_{\text{load}} - B \cdot n$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 2\pi n$$

عملکرد حالت گذرای موتور DC در شار ثابت

❖ رابطه قبل یک سیستم با معادلات دیفرانسیل خطی بود. بنابراین با استفاده از تبدیل لاپلاس با شرایط اولیه صفر:

- متغیرهای ورودی: ولتاژ آرمیچر و گشتاور بار
- متغیرهای حالت: سرعت، زاویه و جریان آرمیچر

$$\tilde{V}_a = (R_a + sL_a) \cdot \tilde{i}_a + K_E \tilde{n}$$

$$s \tilde{n} = \frac{1}{2\pi J} \cdot \left(\frac{K_E}{2\pi} \cdot \tilde{i}_a - \tilde{T}_{load} - B \cdot \tilde{n} \right)$$

$$s \tilde{\theta}_r = 2\pi \tilde{n}$$

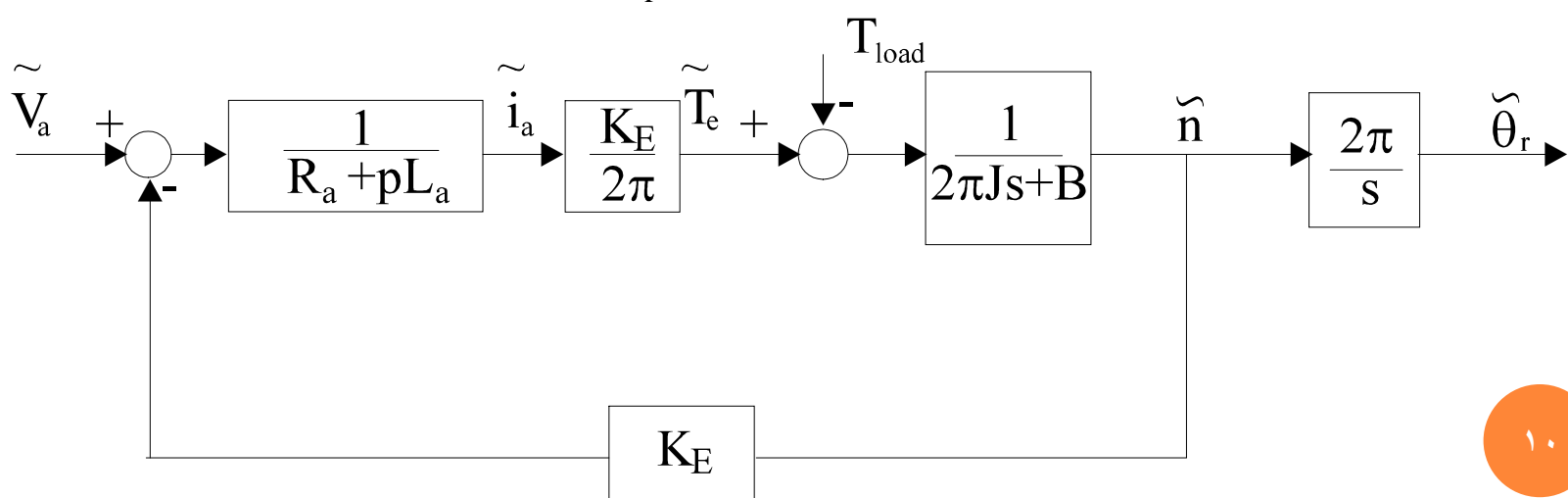


Figure 4.8. Constant flux block diagram of DC brush motor

عملکرد حالت گذرای موتور DC در شار ثابت

❖ توابع تبدیل:

$$\tilde{i}_a = \frac{\tilde{V}_a}{(R_a + sL_a) + K_E \cdot \frac{K_E}{2\pi} \cdot \frac{1}{2\pi Js + B}}; \tilde{n} = \frac{K_E \cdot \tilde{i}_a}{2\pi \cdot (2\pi Js + B)}; \tilde{T}_{load} = 0$$

$$\tilde{i}_a = \frac{\tilde{T}_{load}}{\frac{K_E}{2\pi} + \frac{(2\pi Js + B) \cdot (R_a + sL_a)}{K_E}}; \tilde{n} = \frac{-(R_a + sL_a) \tilde{i}_a}{K_E}; \tilde{V}_a = 0$$

عملکرد حالت گذرای موتور DC در شار ثابت

❖ توابع تبدیل:

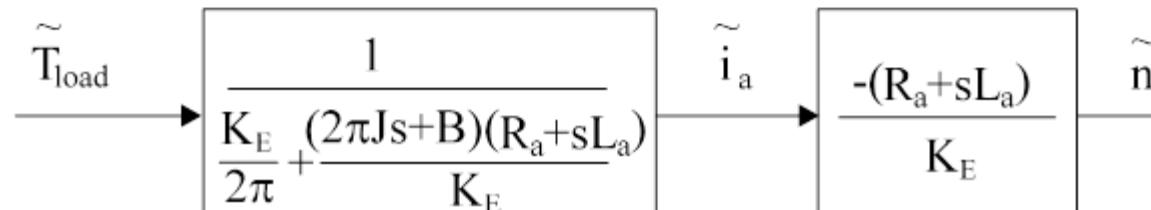
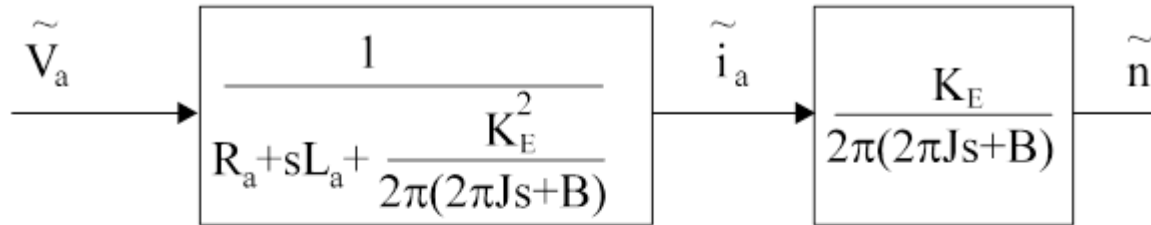


Figure 4.9. Cascaded transfer function for constant flux;
a) for speed control, b) for torque control

عملکرد حالت گذرای موتور DC در شار ثابت

❖ معادله مشخصه:

$$2\pi \cdot (2\pi J s + B) \cdot (R_a + sL_a) + K_E^2 = 0$$

❖ هر دو قطب پایدار می باشند. (چون قسمت حقیقی منفی دارند)

❖ با فرض $B=0$

$$s_{1,2} = \frac{-1 \pm \sqrt{1 - 4\tau_e / \tau_{em}}}{2\tau_e}$$

$$\tau_e = \frac{L_a}{R_a}; \quad \tau_{em} = \frac{4\pi^2 J R_a}{K_E^2}$$

❖ where τ_e is the electrical time constant while τ_{em} is the electromechanical time constant.

عملکرد حالت گذرای موتور DC در شار متغیر

❖ شار متغیر به معنی تغییر جریان تحریک است.

$$\frac{di_e}{dt} = \frac{V_{ex} - R_e \cdot i_e}{L_e}$$

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{V_a - R_a \cdot i_a - n \cdot G \cdot i_e}{L_a}$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{G \cdot i_e}{2\pi} i_a - T_{load} - B \cdot n \right)$$

❖ خطی سازی حول نقطه کار در حالت ماندگار:

$$V_{ex} = V_{ex0} + \Delta V_{ex}; \quad V_a = V_{a0} + \Delta V_a; \quad i_a = i_{a0} + \Delta i_a;$$

$$i_{ex} = i_{ex0} + \Delta i_{ex}; \quad T_{load} = T_{load0} + \Delta T_1; \quad n = n_0 + \Delta n;$$

عملکرد حالت گذرای موتور DC در شار متغیر

❖ برای نقطه حالت ماندگار اولیه:

$$V_{ex0} = R_e \cdot i_{e0}$$

$$V_{a0} = R_a \cdot i_{a0} + n_0 \cdot G \cdot i_{e0}$$

$$\frac{G \cdot i_{e0}}{2\pi} i_{a0} = T_{load0} + B \cdot n_0$$

$$\begin{vmatrix} \Delta V_{ex} \\ \Delta V_a \\ \Delta T_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} R_e + sL_e & 0 & 0 \\ n_0 \cdot G & R_a + sL_a & G \cdot i_{e0} \\ \frac{G \cdot i_{a0}}{2\pi} & \frac{G \cdot i_{e0}}{2\pi} & -(J2\pi s + B) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \Delta i_e \\ \Delta i_a \\ \Delta n \end{vmatrix}$$

❖ مقادیر ویژه ماتریس:

$$(R_e + sL_e) \cdot \left((R_a + sL_a)(J2\pi s + B) + \frac{G^2 \cdot i_{e0}^2}{2\pi} \right) = 0$$

عملکرد حالت گذرای موتور DC در شار متغیر

❖ اولین ریشه مربوط به تحریک:

$$s_0 = -\frac{L_e}{R_e}$$

❖ دوریشه دیگر برابر مقادیری هستند که در حالت شار ثابت بدست می آیند.

❖ کنترل گشتاور-سرعت توسط جریات تحریک (با تغییر ولتاژ تحریک) دارای تاخیر قابل ملاحظه ای است. از اینرو داشتن دینامیک سریع با تغییر ولتاژ تحریک امکان پذیر نیست.

❖ اما کنترل جریان تحریک در منطقه تضعیف شار برای افزایش پوش مشخصه گشتاور-سرعت در یک ولتاژ آرمیچر ثابت مفید است.

موتور DC سري

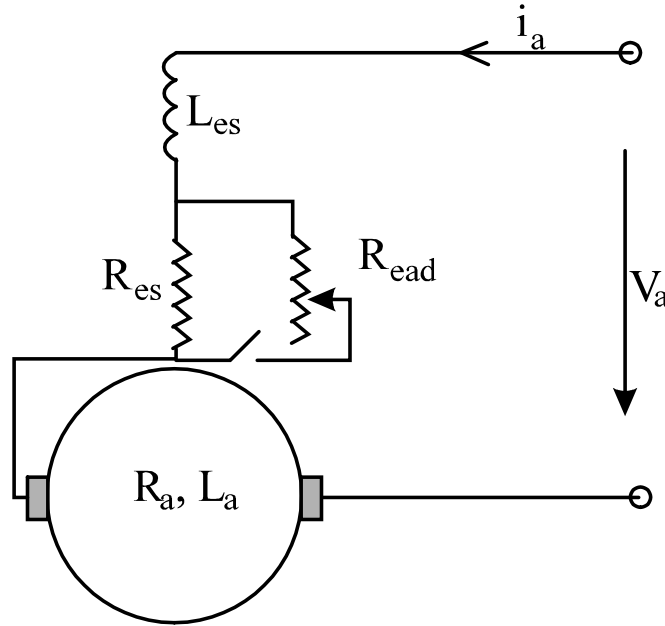


Figure 4.11. The DC brush series motor

❖ با فرض $R_{ead} = \infty$:

$$V_a = (R_a + R_{es}) \cdot i_a + (L_a + L_{es}) \frac{di_a}{dt} + nGi_a$$

$$T_e = \frac{Gi_a^2}{2\pi} = J2\pi \frac{dn}{dt} + T_{load} + B \cdot n$$

موتور DC سری

❖ با خطی سازی:

$$V_a = V_{a0} + \Delta V_a; \quad T_{load} = T_{load0} + \Delta T_l;$$

$$n = n_0 + \Delta n; \quad i_a = i_{a0} + \Delta i_a$$

$$\begin{vmatrix} \Delta V_a \\ \Delta T_l \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} R_a + R_{es} + n_0 \cdot G + s(L_a + L_{es}) & G i_{a0} \\ 2 \frac{G}{2\pi} i_{a0} & -(2\pi J s + B) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \Delta i_a \\ \Delta n \end{vmatrix}$$

$$(R_a + R_{es} + n_0 \cdot G + s \cdot (L_a + L_{es})) \cdot (2\pi J s + B) + 2 \frac{G^2}{2\pi} \cdot i_{a0}^2 = 0$$

❖ ثابت زمانی موتور سری به دلیل وجود جمله $n_0 G$ به سرعت بستگی دارد. در سرعت صفر، به دلیل $Res < Ra$ و $Les > La$ ثابت زمانی نسبت به موتور شار ثابت بزرگتر است. بنابراین دستیابی به پاسخ گشتاور سریع در موتور سری به سادگی فراهم نمی شود.

موتور DC سری

❖ در شرایط ماندگار:

$$i_a = \frac{V_a}{(R_a + R_{es}) + n \cdot G} = \sqrt{\frac{2\pi}{G} T_e}$$

$$P_e = T_e \cdot 2\pi n = \frac{V_a^2 \cdot G \cdot n}{(R_a + R_{es} + nG)^2}$$

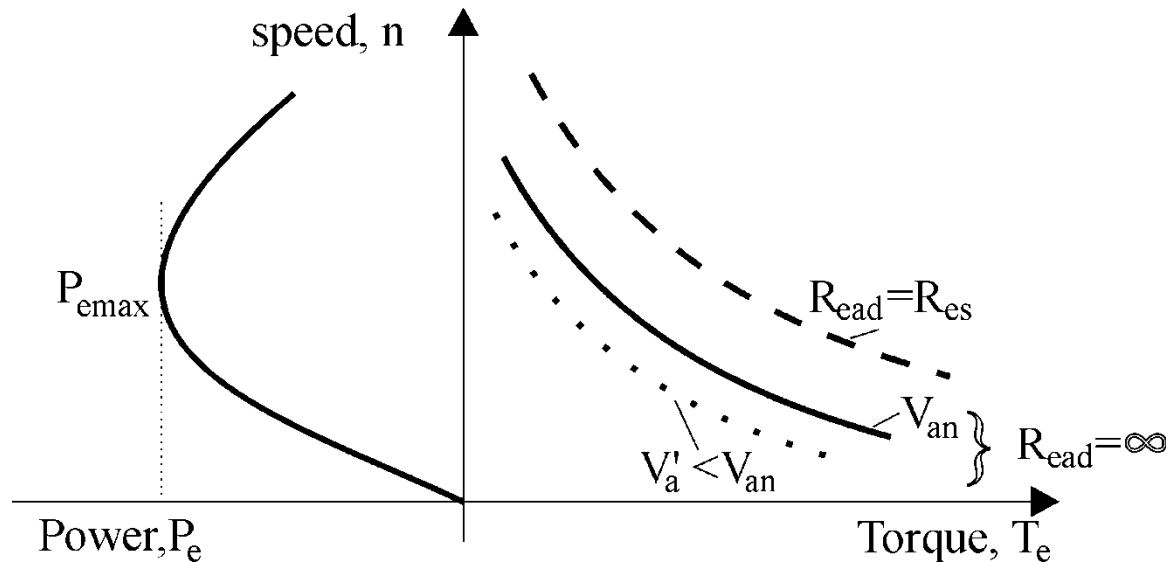


Figure 4.12. Speed/torque curve of DC brush series motor