

CAPITOLUL 7

Motoare de curent continuu

OBIECTIVELE

După studierea acestui capitol, ar trebui să puteți să:

- Explicați teoria funcționării motoarelor electrice în general și a motoarelor de curent continuu în special.
 - Distingeți între caracteristicile motoarelor cu înfășurare serie, înfășurare derivație, compuse și cu magnet permanent.
 - Utilizați curba de turație a cuplului unui motor pentru a prezice performanța acestuia.
 - Selectați un motor de curent continuu pe baza cerințelor mecanice.
 - Înțelegeți funcționarea driverelor de amplificator liniar pentru motoarele de curent continuu care încorporează tranzistoare de putere, amplificatoare IC, tranzistoare Darlington și MOSFETS de putere.
 - Înțelegeți controlul vitezei motorului DC folosind concepte de modulare a lățimii impulsului.
 - Înțelegeți funcționarea unui motor de curent continuu din curent alternativ redresat, folosind circuite cu redresor cu siliciu.
 - Înțelegeți principiile de funcționare ale motoarelor de curent continuu fără perii.
-

INTRODUCERE

O componentă indispensabilă a sistemului de control este actuatorul. Servomotorul este prima componentă a sistemului care se mișcă efectiv, transformând energia electrică în mișcare mecanică. Cel mai frecvent tip de acționare este motorul electric.

Motoarele sunt clasificate ca fiind fie DC, fie ca AC, în funcție de tipul de putere pe care îl folosesc. Motoarele de curent alternativ (prezentate în capitolul 9) au unele avantaje față de motoarele de curent continuu: tind să fie mai mici, mai fiabile și mai puțin costisitoare. Cu toate acestea, ele rulează în general la o viteză fixă care este determinată de frecvența liniei. Motoarele de curent continuu au capacitate de control al vitezei, ceea ce înseamnă că viteza, cuplul și chiar direcția de rotație pot fi schimbate în orice moment pentru a îndeplini noile condiții. De asemenea, motoarele de curent continuu mai mici funcționează în mod obișnuit la tensiuni mai mici (de exemplu, un motor cu acționare pe disc de 12 V), ceea ce le face mai ușor de interfațat cu electronica de control.

7.1 TEORIA FUNCȚIONĂRII

Descoperirea care a dus la inventarea motorului electric a fost aceasta: Un conductor purtător de curent va furniza o forță atunci când este plasat într-un câmp magnetic. Conductorul poate fi orice metal-fier, cupru, aluminiu, și așa mai departe. Direcția forței este perpendiculară atât pe câmpul magnetic, cât și pe curent (Figura 7.1). O demonstrație a acestui principiu este ușor de realizat cu un magnet puternic, baterie lanternă și un fir și este foarte recomandată! Așezați firul între polii magnetului și conectați-l și deconectați firul de la baterie. De fiecare dată când completați circuitul, ar trebui să simțiți un pic puls pe sârmă. Magnitudinea forței pe sârmă poate fi calculată din următoarea ecuație:

$$F = IBL \sin \theta \quad (7.1)$$

unde

F = forță asupra conductorului (în Newton)

I = curent prin conductor (în amperi)

B = densitatea fluxului magnetic (în gauss)

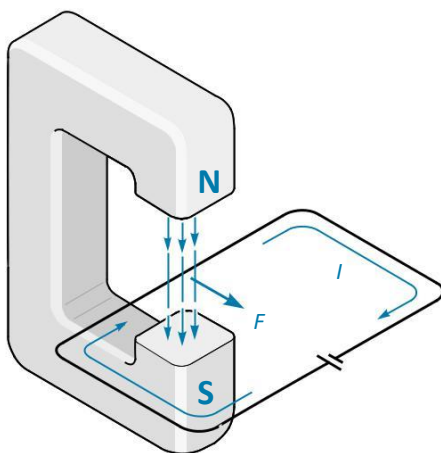
L = lungimea firului (în metri)

θ = unghiul dintre câmpul magnetic și curent

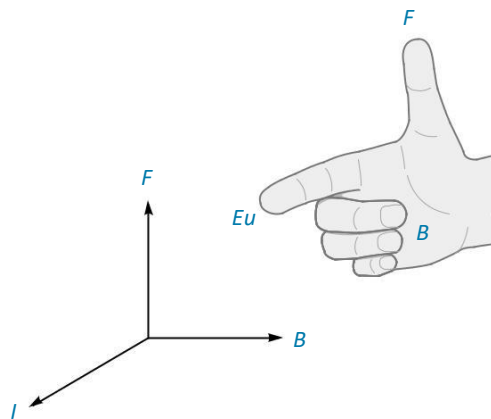
Un motor electric trebuie să valorifice această forță astfel încât să provoace o mișcare rotativă. Acest lucru se poate face prin formarea firului într-o buclă și plasarea acestuia în câmpul magnetic (Figura 7.2). Bucla (sau *bobina*) de sârmă este făcută să se rotească în jurul axei afișate și este

Figura 7.1

Acțiunea forței pe un fir metalic într-un câmp magnetic.



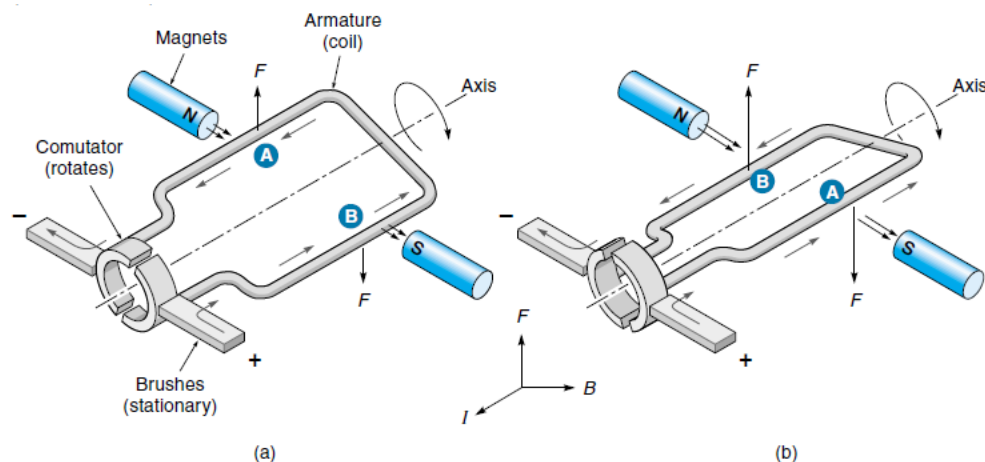
(a) Configurație experimentală



(b) Direcțiile lui I , F și B sunt reciproc ortogonale (flux convențional de curent)

Figura 7.2

O acțiune simplă a motorului de curent continuu (flux convențional).



numită **înfășurarea armăturii**. Armătura este plasată într-un câmp magnetic numit **câmp**. **Comutatorul (sau colectorul)** și **periile** furnizează curentul armăturii, permițându-i în același timp să se rotească.

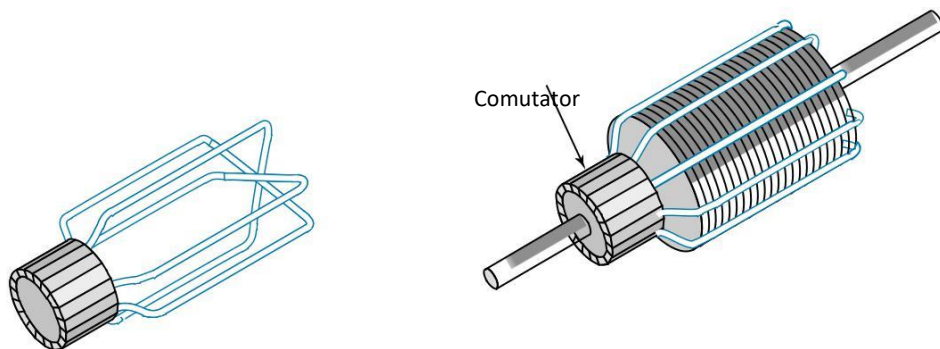
Pentru a înțelege cum funcționează motorul, uitați-vă la figura 7.2 litera (a). Observați că segmentul de sârmă A și B al bobinei sunt în același câmp magnetic, dar curentul în sârmă segmentul A iese din pagină, în timp ce curentul în segmentul de sârmă B se întâmplă în. Aplicând diagrama forței din figura 7.1 litera (b) (și repetată în figura 7.2), vedem că segmentul de sârmă A al bobinei ar fi forțat să se miște în sus, în timp ce segmentul de sârmă B ar fi forțat să coboare. Aceste forțe ar face ca bobina să se rotească în sensul acelor de ceasornic. Figura 7.2 (b) arată situația după ce bobina s-a rotit la aproximativ 90°. Curentul a inversat acum direcția în bobină, deoarece contactele comutator s-au rotit și fac acum contact cu peria opusă. Acum, segmentul de sârmă A al bobinei va fi forțat să se miște în jos și segmentul de sârmă B în sus, ceea ce face ca armătura să continue să se rotească în sensul acelor de ceasornic. **Cuplul, așa cum se explică în capitolul 5, este forța de rotație pe care un motor o poate exercita. Observați că cuplul va fi la maxim atunci când bobina este orizontală și va scădea la zero atunci când bobina este verticală (similar cu pedalarea la o bicicletă).**

Pentru a inversa direcția motorului, polaritatea tensiunii la comutator este inversată. Acest lucru face ca forțele de pe bobina armăturii să fie inversate, iar motorul ar rula apoi în direcția opusă.

Figura 7.3 prezintă armătura unui motor practic. Observați că există mai multe bobine și fiecare bobină determină forțele descrise în paragraful precedent și astfel contribuie la cuplul general al motorului. Fiecare bobină este conectată la o pereche separată

Figura 7.3

Armătură cu motor
de curent continuu.



(a) Armătură simplificată (b) O armătură reală (multe bucle) care prezintă mai multe bucle

a segmentelor comutatoare, determinând curentul din fiecare bobină să schimbe direcțiile la momentul potrivit pentru fiecare bobina individuală. Efectul general este de a oferi aproximativ același cuplu pentru orice poziție de armătură (cum ar fi un motor multipiston).

Unul dintre cei mai importanți parametri de funcționare ai oricărui motor este cuplul. **Cuplul motorului electric este direct proporțional cu forța de pe firele armăturii.** Din ecuația 7.1, vedem că forța este proporțională cu câmpul magnetic și curentul (nu tensiunea). Prin colectarea parametrilor mecanici ai motorului (cum ar fi numărul de poli) într-o singură constantă K , cuplul motorului poate fi exprimat ca

$$T = K_T I_A \Phi \quad (7.2)$$

unde

T = cuplul motorului

K_T = o constanta bazată pe construcția motorului

I_A = curent de armătură

Φ = flux magnetic

Până acum ne-am uitat la modul în care motorul transformă energia electrică în energie mecanică. Se pare că același dispozitiv (motor) este, de asemenea, capabil să convertească energia mecanică în energie electrică, caz în care se numește **generator**. Spre exemplu, dacă bobina de armătură din figura 7.2 ar fi rotită în câmpul magnetic de o anumită forță externă, pe segmentele comutatoare ar apărea o tensiune [numită *forța electromotivă sau electromotoare* (EMF)]. Magnitudinea EMF este dată în ecuația 7.3:

$$EMF = K_E \Phi S \quad (7.3)$$

unde

EMF = tensiunea generată de motorul DC

K_E = o constantă bazată pe construcția motorului

Φ = flux magnetic

S = viteza motorului (rpm)

Deși poate părea ciudat, această tensiune EMF este generată chiar și atunci când motorul funcționează pe propria putere, dar are polaritatea opusă tensiunii liniei; prin urmare, se numește **contra-FME (CEMF)**. *Efectul său este de a anula o parte din tensiunea liniei.* Cu alte cuvinte, tensiunea reală disponibilă armăturii este tensiunea liniei minus MIE:

$$V_A = V_{In} - \text{CEMF} \quad (7.4)$$

unde

V_A = tensiunea reală disponibilă armăturii

V_{In} = tensiunea liniei furnizate motorului

CEMF = tensiunea generată în motor

Nu puteți măsura direct V_A cu un voltmetru, deoarece este o tensiune eficientă în interiorul armăturii. Cu toate acestea, *există dovezi fizice* că CEMF există deoarece curentul de armătură este, de asemenea, redus, astfel cum se indică în ecuația 7.5:

$$I_A = \frac{V_{In} - \text{CEMF}}{R_A} \quad (7.5)$$

Unde:

I_A = curent de armătură

V_{in} = tensiunea liniei la motor

R_A = rezistență la armătură

CEMF = tensiunea generată în motor

Ecuația 7.5 (care este sub forma legii lui Ohm) ne spune că curentul de armătură este o funcție a tensiunii aplicate minus CEMF. Deoarece CEMF crește odată cu viteza motorului, cu cât motorul funcționează mai repede, cu atât motorul va trage mai puțin curent și, în consecință, cuplul său se va diminua. Acest lucru explică de ce majoritatea motoarelor de curent continuu au o viteză maximă finită; în cele din urmă, dacă motorul continuă să meargă mai repede, CEMF aproape că va anula tensiunea liniei, iar curentul de armătură se va apropia de zero.

Relația reală dintre viteza motorului și CEMF urmează și este derivată din ecuația 7.3:

$$S = \frac{\text{CEMF}}{K_E \phi} \quad (7.6)$$

unde

S = viteza motorului (rpm)

CEMF = tensiunea generată în cadrul motorului

K_E = o constantă a motorului

ϕ = flux magnetic

Uitându-ne la ecuația 7.6, vedem că viteza motorului este direct proporțională cu CEMF (tensiune) și (surprinzător) invers proporțional cu fluxul de câmp.

EXEMPLUL 7.1

Un motor de 12 Vdc are o rezistență la armătura de 10Ω și conform fisei sale de specificații generează un CEMF la o viteză de 0,3 V/100 rpm. Găsiți curentul real al armăturii la 0 rpm și la 1000 rpm.

SOLUȚIE

Putem găsi curentul de armătură cu ecuația 7.5. În primul caz, atunci când motorul nu se rotește deloc (0 rpm), CEMF va fi de 0 V:

$$I_A = \frac{V_{in} - \text{CEMF}}{R} = \frac{12 \text{ V} - 0 \text{ V}}{10} = 1.2 \text{ A}$$

Pentru al doilea caz (1000 rpm), determinați MIE înainte de a aplica Ecuația 7.5. Având în vedere viteza MIE de 0,3 V/100 rpm,

$$\text{CEMF} = \frac{0.3 \text{ V}}{100 \text{ rpm}} \times 1000 \text{ rpm} = 3 \text{ V}$$

Apoi

$$I_A = \frac{V_{in} - \text{CEMF}}{R_a} = \frac{12 \text{ V} - 3 \text{ V}}{10} = \frac{9 \text{ V}}{10} = 0.9 \text{ A}$$

Astfel, vedem că, curentul de armătură este redus în motorul în funcțiune.

Motoarele de curent continuu au o proprietate numită reglarea vitezei. **Reglarea vitezei** este abilitatea unui motor de a-și menține viteza atunci când se aplică sarcina. Baza acestui fenomen de auto-reglare este CEMF. Când sarcina motorului este crescută, viteza tinde să scadă, dar viteza mai mică reduce CEMF, ceea ce permite mai mult curent în armătură. Curentul crescut duce la creșterea cuplului, ceea ce împiedică motorul să încetinească și mai mult. Reglarea vitezei este de obicei exprimată ca procent, așa cum se arată în ecuația 7.7:

$$\% \text{ speed regulation} = \frac{S_{NL} - S_{FL}}{S_{FL}} \times 100 \quad (7.7)$$

unde

S_{NL} = viteză fără sarcină

S_{FL} = viteză în sarcină

EXEMPLUL 7.2

Un motor are o viteză fără sarcină de 1150 rpm. Când sarcina maximă pentru diferite aplicații este aplicată motorului, viteza scade la 1000 rpm. Găsiți regulatorul de viteză pentru această aplicație.

SOLUȚIE

Aplicând ecuația 7.7, obținem

$$\frac{S_{NL} - S_{FL}}{S_{FL}} \times 100 = \frac{1150 \text{ rpm} - 1000 \text{ rpm}}{1000 \text{ rpm}} \times 100 = 15.0\%$$

7.2 MOTOARE DE CURENT CONTINUU CU ÎNFĂȘURARE ÎN CÂMP

Motoarele de câmp cu bobine folosesc un electromagnet numit **înfășurarea câmpului** pentru a genera câmpul magnetic. Singura altă modalitate de a genera un câmp magnetic este cu magneți permanenți, care vor fi discutați mai târziu. Viteza motoarelor cu bobine este controlată prin variația tensiunii la armătură sau înfășurări de câmp. Figura 7.4 prezintă un exemplu de

Figura 7.4
Motor de curent continuu
cu înfășurări

FEATURES

- ADJUSTABLE SPEED
- 90 V ARMATURE 50/100 V FIELD(3)
- CLASS F INSULATION
- 40°C AMBIENT
- EXPLOSION-PROOF(1)
- FOR OPERATING FROM FULL WAVE SINGLE-PHASE RECTIFIED POWER (TYPE K)
- RIGID MOUNT C-FACE

WOUND FIELD

EXPLOSION-PROOF

1/4 – 1 HP

TOTALLY ENCLOSED • FAN-COOLED

HP	RPM	Enclosure	Frame *
1/4	3500	TEFC-XP	HM56HC
	2500	TEFC-XP	HB56HC
	1750	TEFC-XP	HB56HC ♦
	1150	TEFC-XP	HU56HC
1/3	3500	TEFC-XP	HG56HC
	2500	TEFC-XP	HU56HC
	1750	TEFC-XP	HB56HC ♦
	1150	TEFC-XP	HJ56HC
1/2	3500	TEFC-XP	HU56HC
	2500	TEFC-XP	HG56HC
	1750	TEFC-XP	HJ56HC ♦
	1150	TEFC-XP	HE56HC
3/4	3500	TEFC-XP	HU56HC
	2500	TEFC-XP	HJ56HC
	1750	TEFC-XP	HJ56HC ♦
1	3500(2)	TEFC-XP	HJ56HC
	2500(2)	TEFC-XP	HE56HC
	1750(2)	TEFC-XP	HE56HC ♦

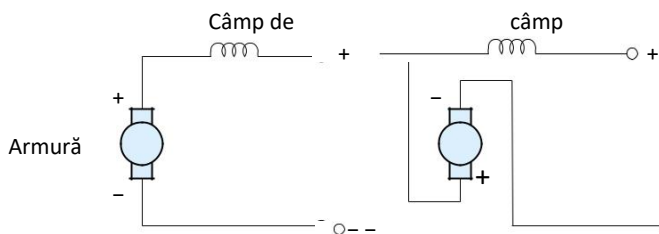
motor cu bobine. Această serie specială de motoare este disponibilă de la 1/4 la 1 CP și la mai multe viteze nominale standard. **Viteza nominală** a unui motor viteza când se efectuează o rotație la puterea nominală – când motorul este descărcat- fără sarcină, acesta va merge mai repede decât la viteza nominală. Aceste motoare sunt concepute pentru a funcționa la 90 Vdc, deoarece 90 V este despre ceea ce un circuit redresor în mod practic, poate produce la standardul de alimentare de 120 Vac. Viteza poate fi controlată prin reglarea tensiunii redresate, așa cum se va discuta mai târziu în acest capitol. Există trei tipuri de bază de motoare cu bobină: bobină serie, rana șuntului și compusă.

Motoare cu înfășurare (excitație) serie

Într-un motor cu înfășurare serie, armătura și înfășurările câmpului sunt conectate în serie [Figura 7.5(a)]. Această configurație oferă motorului un cuplu de pornire mare, care este utilizat în multe situații - de exemplu, motoarele de pornire ale mașinii. Explicația pentru acest mare

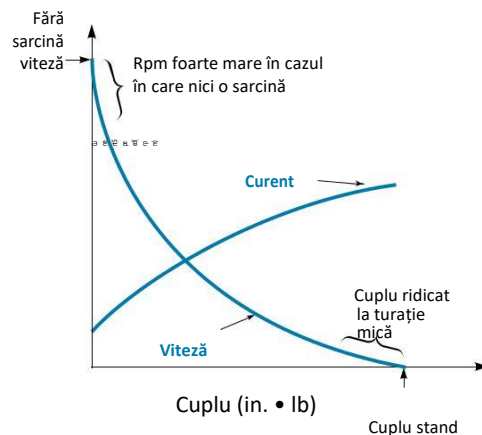
Figura 7.5

Motoare de curent continuu serie și scurtcircuit.

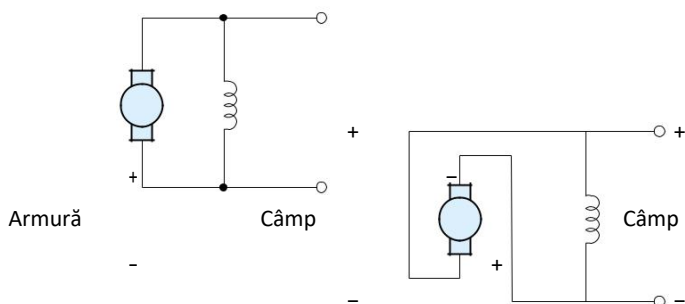


(a) Circuitul motorului de serie

(b) Motorul serie inversat

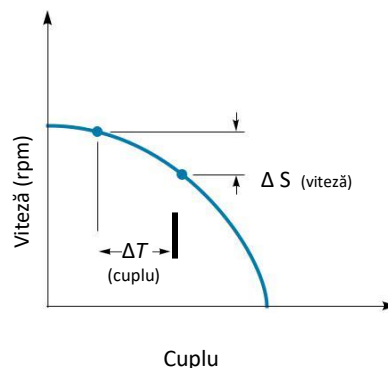


(c) Curba cuplu-turație pentru motorul de serie



(d) Circuitul motorului derivație

(e) Motorul derivație inversat



(f) Curba cuplu-turație pentru motorul derivație

cuplul inițial este după cum urmează: Când motorul este oprit, nu există CEMF, iar tensiunea completă este disponibilă pentru înfășurări. Prin urmare, curentul inițial de armătură este mare; și fiind în serie cu înfășurările de câmp, același curent creează și un câmp magnetic mare. Combinația dintre un curent de armătură mare și un flux mare de câmp este ceea ce produce cuplul mare de pornire (a se vedea ecuația 7.2). Odată ce motorul începe să se rotească, CEMF-ul în creștere reduce curenții motorului și, prin urmare, cuplul. Deoarece bobina de câmp poartă curentul complet al armăturii, trebuie să aibă o rezistență scăzută.

O altă caracteristică a motorului de serie este că tinde să "fugă" (merge mai repede și mai repede) în condiții fără sarcină. Pe măsură ce curentul de câmp se diminuează față de CEMF care este în creștere, fluxul câmpului magnetic scade, de asemenea, care, conform ecuației 7.6, tinde să accelereze motorul, ceea ce crește și mai mult CEMF. Efectul general al acestei logici aparent circulare este că motorul va continua să accelereze până când cuplul este echilibrat de forțele de frecare. Cele mai multe motoare mai mici pot face față vitezelor mari, fără a provoca nici o deteriorare, dar motoare mai mari pot "zbură" literalmente în cazul în care operează fără sarcină.

Figura 7.5 (c) prezintă o **curbă tipică de turație a cuplului** pentru un motor cu înfășurare în serie. Înțelegerea acestui grafic este importantă deoarece este cel mai util instrument în descrierea caracteristicilor de funcționare ale unui anumit motor. Axa verticală are două scări: viteză și curent. Axa orizontală reprezintă cuplul. Așa cum am descris mai devreme, cuplul este o măsură a rezistenței motorului în rotirea arborelui său și este rezultatul direct al forțelor asupra conductoarelor de armătură. Graficul arată relația cuplu-turație pentru o tensiune particulară aplicată constant. O tensiune motorie mai mică ar da o curbă de aceeași formă, dar situată în stânga celei afișate.

Privind curba [Figura 7.5(c)], observați că *viteza scade pe măsură ce cuplul crește*. Acest lucru este valabil pentru toate motoarele electrice și are sens intuitiv; când sarcina este mărită, motorul încetinește. De exemplu, luați în considerare un ferăstrău circular electric. Puteți auzi motorul încetinind sub sarcină. *Cuplul maxim pe care îl poate oferi motorul de curent continuu apare atunci când motorul este încărcat atât de mult astfel încât tinde să se oprească*. Acesta se numește **cuplul standard**. Unele motoare sunt concepute pentru a funcționa chiar până la cuplul standard; de fapt, multe motoare din sistemul de control funcționează în acest mod tot timpul. De exemplu, un motor care conduce un braț robot trebuie să mute brațul încărcat dintr-o poziție de repaus în alta. O coincidență utilă este că, cuplul standard este, de asemenea, cuplul maxim, deoarece majoritatea sistemelor mecanice necesită mai multă forță pentru a face lucrurile să se miște dintr-o poziție de repaus decât în alte momente.

Capătul superior al curbei [Figura 7.5(c)] relevă **viteza fără sarcină**. Aceasta este viteza pe care motorul ar atinge-o dacă i s-ar permite să funcționeze fără absolut nicio sarcină externă pe ea. În motoarele de serie, viteza fără sarcină este stabilită de o serie de factori, inclusiv frecarea rulmentului și rezistența la aer a pieselor rotative, și așa este ceva imprevizibil. În alte tipuri de motoare, efectul CEMF este principalul fac-tor în determinarea vitezei fără sarcină. Observați că la viteza fără sarcină motorul este capabil să nu facă absolut nici o lucrare utilă, deoarece furnizează cuplu zero lumii exterioare. Prin urmare, *orice motor care face ceva util trebuie să meargă la*

o viteză mai mică decât cea fără sarcină. După cum sa subliniat anterior, motoarele de serie mai mare ar putea fi distruse dacă funcționează fără sarcină externă și, din acest motiv, nu sunt niciodată conectate la o sarcină cu o centură - centurile se rup!

Celălalt parametru grafic în figura 7.5(c) este curentul (prezentat ca o linie punctată). Curentul crește pe măsură ce cuplul crește, deoarece forța asupra conductoarelor de armătură este proporțională cu curentul de armătură. Poate părea înapoi că atunci când motorul se rotește mai repede atrage mai puțin curent, dar un motor mai rapid înseamnă că are mai puțină sarcină pe el.

Curba viteză-cuplu a motorului de serie este foarte neliniară. Cuplul standard este o calitate de dorit pentru multe aplicații casnice, cum ar fi macarale, scule electrice portabile, și motoare de pornire auto. Motoarele de serie sunt mai puțin capabile să fie utilizate în aplicațiile de control, deoarece caracteristicile neliniare complică matematica implementată în controler. Un ultim comentariu asupra motorului de serie: La fel ca toate motoarele câmpului cu înfășurare, inversarea polarității tensiunii liniei inversează atât câmpul armăturii, cât și înfășurările câmpului, *determinând motorul să continue să se rotească în aceeași direcție.*

Pentru a inversa direcția de rotație, polaritatea *numai* a armăturii (sau a câmpului) ar trebui inversată, așa cum se arată în figura 7.5 litera (b).

Motoare cu înfășurare derivație (excitație derivație)

În **motorul cu înfășurare derivație**, armătura și înfășurările de câmp sunt conectate în paralel [Figura 7.5 litera (d)]. Cu această configurație, curentul din câmp depinde numai de tensiunea de alimentare. Cu alte cuvinte, fluxul de câmp nu este afectat de variațiile de curent datorate MIE. Acest lucru duce la un motor cu o reglare mai naturală a vitezei.

Curba cuplu-turație din figura 7.5 (f) prezintă grafic caracteristicile motorului cu înfășurare derivație. Observați că atât cuplul standului, cât și valorile turației fără sarcină sunt relativ scăzute în comparație cu motorul cu înfășurare serie. De asemenea, porțiunea superioară a curbei tinde să fie mai orizontală. Această (mai mult) regiune orizontală este zona de bună utilizare a vitezei. O creștere a cuplului [ΔT din figura 7.5 litera (f)] reduce viteza motorului cu doar ΔS . În practică, acest lucru înseamnă că un motor cu înfășurare derivație va încetini oarecum atunci când sarcina crește și va accelera oarecum atunci când sarcina este redusă, dar, în medie, un motor de șunt de $\frac{1}{4}CP$ va schimba viteza doar 15% de la o sarcină fără sarcină la o operațiune nominală cu sarcină completă.

Deoarece motorul înfășurare derivație tinde să funcționeze la o viteză relativ constantă, acesta a fost folosit în aplicații precum ventilatoare, suflante, benzi transportoare și mașini-unelte. Motorul poate fi proiectat să funcționeze la aproape orice combinație turație - cuplu la o anumită tensiune de linie, specificând numărul de înfășurări ale câmpului. Pentru o tensiune de linie fixă, viteza poate fi controlată (în limite) prin introducerea unui reostat în serie cu înfășurarea câmpului. Pe măsură ce rezistența este crescută, curentul la câmp este redus, ceea ce reduce fluxul de câmp și [în funcție de ecuațiile vitezei motorului (7,6)] accelerează motorul. Controlul vitezei poate fi realizat și prin reglarea directă a tensiunii liniei. Ca și în cazul motorului de serie, motorul cu înfășurare derivație este inversat prin inversarea polarității numai a armăturii sau bobinei de câmp, dar nu ambele (de obicei este armătura). Circuitul pentru un motor înfășurare derivație este prezentat în figura 7.5 litera (e).

EXEMPLUL 7.3

Un motor cu înfășurare derivație de 90 Vdc de pe o bandă transportoare trebuie înlocuit. Placa de identificare de pe vechiul motor este imposibil de citit, dar știți că a fost folosit la aproximativ 1750 rpm. Folosind ingeniozitatea și instrumentele de măsurare comune, determinați specificațiile pentru un motor nou și selectați unul din lista din figura 7.4.

SOLUȚIE

Problema se reduce la specificarea cailor putere și la cunoașterea faptului că trebuie să știți cât de mult cuplu furniza vechiul motor. Folosind o cheie de cuplu, sau orice dispozitiv de măsurare a cuplului, întoarceți arborele benzii transportoare și determinați că necesită aproximativ 2 ft · lb să-l păstrați în mișcare.

Pentru a converti aceste date în cai putere necesită două formule:

$$P = TS \quad (7.8)$$

unde

P = putere

T = cuplu

S = viteza motorului

$$1 \text{ hp} = 33,000 \frac{\text{ft} \cdot \text{lb}}{\text{min}} \quad (7.9)$$

unde

$\text{hp} = \text{CP} = \text{cai putere}^*$

În primul rând, utilizați ecuația 7.8 pentru a calcula puterea necesară pentru a rula banda transportoare (*rotațiile* trebuie convertite în *radiani*):

$$P = TS = 2 \text{ ft} \cdot \text{lb} \times \frac{1750 \text{ rev}}{\text{min}} \times \frac{2\pi \text{ rad}}{\text{rev}} = 21,990 \frac{\text{ft} \cdot \text{lb}}{\text{min}} \quad (7.9)$$

Acum utilizați ecuația 7.9 pentru a converti acest rezultat în cai putere:

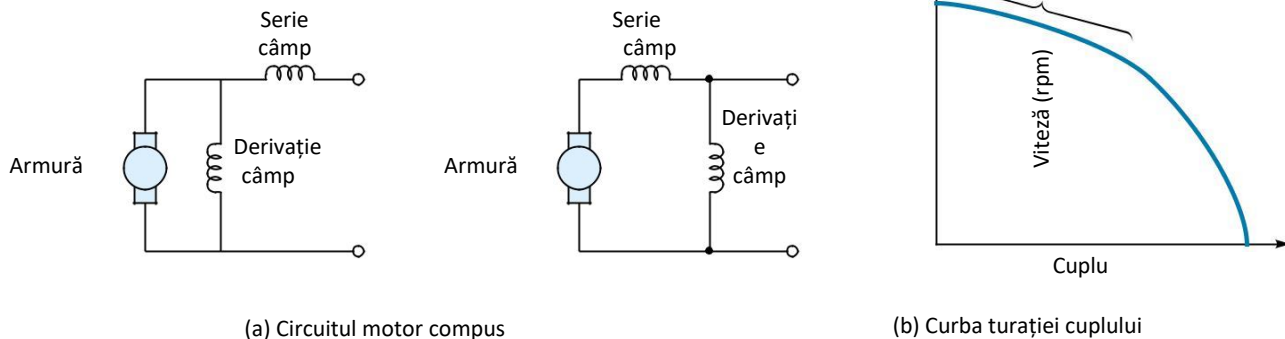
$$\frac{21,990 \text{ ft} \cdot \text{lb}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ hp} \cdot \text{min}}{33,000 \text{ ft} \cdot \text{lb}} = 0.666 \text{ hp}$$

Deci, pe baza calculelor noastre, avem nevoie de un motor care se rotește la 1750 rpm cu cel puțin 0.666 CP. Privind în jos lista din Figura 7.4, vedem un model de $\frac{3}{4}\text{CP}$ cu o viteză nominală de 1750, care ar trebui să funcționeze bine.

* Unitatea de cai putere (HP) a fost dezvoltată de James Watt, care a stabilit că un cal ar putea ridica 33.000 ft-lb pe minut de cărbune dintr-o mină de cărbune.

Figura 7.6

Un motor de curent continuu compus.



Motoare compuse

Motorul compus are atât înfășurări de câmp derivație, cât și serie, deși nu sunt neapărat de aceeași dimensiune. Există două configurații ale motorului compus, șuntul scurt și șuntul lung, așa cum se arată în figura 7.6 litera (a). De obicei, bobinele de serie și șunt sunt înfășurate în aceeași direcție, astfel încât fluxurile de câmp să se adauge. Scopul principal al înfășurării seriei este de a oferi motorului un cuplu de pornire mai mare. Odată ce motorul este rulat, CEMF reduce rezistența câmpului de serie, lăsând înfășurarea șuntului să fie sursa principală de flux de câmp și oferind astfel o anumită reglare a vitezei. De asemenea, combinația celor două câmpuri care acționează împreună tinde să îndrepte (liniarizeze) o porțiune a curbei cuplu-turație [Figura 7.6 (b)].

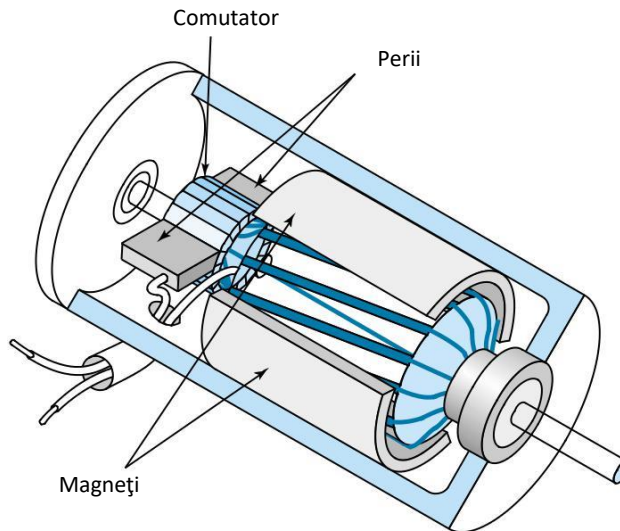
Motorul discutat până acum, unde se adaugă câmpurile, se numește motor **compus cumulativ**. Mai puțin frecvent este **motorul compus diferențial**, unde bobinele de câmp sunt înfășurate în direcții opuse. Motorul compus diferențial are un cuplu de pornire foarte scăzut, dar o reglare excelentă a vitezei. Cu toate acestea, deoarece poate fi instabil la sarcini mai mari, este rar folosit. Direcția de rotație a motorului compus este inversată prin inversarea polarității înfășurărilor armăturii.

7.3 MOTOARE CU MAGNET PERMANENT

Motoarele cu magnet permanent (PM) utilizează magneți permanenți pentru a furniza fluxul magnetic pentru câmp (a se vedea figura 7.7). Armătura este similară cu cele din motoarele câmpului înfășurat discutate mai devreme. Se utilizează trei tipuri de magneți: (1) Magnetul Alnico (aliaj pe bază de fier) are o densitate de flux mare, dar își pierde magnetizarea în anumite condiții, cum ar fi un câmp puternic de armătură în timpul funcționării blocate; (2) magneții de ferită (ceramică) au o densitate de flux scăzut, deci trebuie să fie mai mari, dar nu sunt ușor demagnetizați; (3) magneții mai noi, așa-numiții magneți rari, făcuți din samariu-cobalt sau neodim-cobalt, au proprietățile dorite combinate de densitate mare a fluxului și rezistență ridicată la demagnetizare

Figura 7.7

Diagrama în secțiune a unui motor cu magnet permanent.



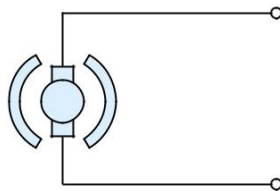
. În prezent, dimensiunea motoarelor PM este limitată la câțiva cai putere sau mai puțin. Motoarele PM mici sunt utilizate pe scară largă în mașinile de birou, cum ar fi imprimantele și unitățile de disc, jucăriile, echipamentele, cum ar fi VCR-urile și camerele (pentru zoom și focalizare automată) și multe locuri din industrie. Motoarele PM mai mari sunt utilizate în sisteme de control, cum ar fi roboții industriali.

Relația dintre cuplu și viteză

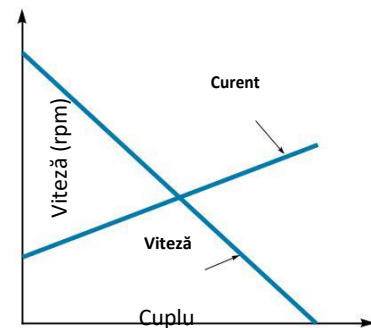
Faptul că fluxul de câmp al unui motor PM rămâne constant indiferent de viteză face o curbă foarte liniară a cuplului-turație. Acest lucru este foarte de dorit pentru aplicațiile de control, deoarece simplifică ecuațiile de control. Figura 7.8 prezintă o curbă tipică a motorului PM și a turației cuplului. Observați că "curbele" sunt linii drepte atât pentru viteză, cât și pentru curent. Absența bobinelor de câmp este evidentă în schema [Figura 7.8(a)],

Figura 7.8

Un motor cu magnet permanent.



(a) simbolul motorului PM



(b) curba cuplului-turației motorului

care arată tensiunea aplicată care alimentează numai armătura. Motorul PM este ușor de inversat prin inversarea polarității tensiunii aplicate. Exemplul 7.4 ilustrează modul în care curba cuplu-turație poate fi utilizată pentru a determina performanța unui motor în orice condiții de sarcină.

EXEMPLUL 7.4

Figura 7.9 litera (a) prezintă curba cuplu-turație a unui motor PM. Găsiți viteza și curentul motorului pentru următoarele:

- a. Condiții fără sarcină și oprire
- b. Ridicarea unei sarcini de 10 oz cu un scripete cu rază de 2 in.
- c. Un motor care conduce un braț robotic cu o greutate

SOLUȚIE

- a. Dacă tensiunea este aplicată motorului fără sarcină atașată arborelui, motorul se va întoarce la viteza fără sarcină de 1000 rpm. Pe de altă parte, în cazul în care arborele a fost fixat astfel încât să nu se poată întoarce, motorul ar exercita cuplul stand de 100 inch · oz pe clemă și consumă 260 A de curent.
- b. O greutate de 10 oz este atârnat de un scripete rază de 2-in. . Scripetele se află pe arborele motorului [Figura 7.9 (b)]. Cuplul este egal cu distanța timpilor de forță, astfel încât cuplul motorului necesar pentru a ridica greutatea este

$$2 \text{ in.} \times 10 \text{ oz} = 20 \text{ in.} \cdot \text{oz}$$

Din grafic, putem vedea că, la un cuplu de 20 inch · oz, viteza a scăzut la 800 rpm, iar curentul este de până la 125 mA.

- c. Motorul este atașat la un braț robot de 12 in. (cântărind 10 oz). La capătul brațului se sprijină un măr de 8 oz [Figura 7.9 (c)]. Sarcina totală a motorului se calculează după cum se arată mai jos. Notă brațul este considerat a fi o masă punct de 10 oz la centrul său de greutate, care este de 6 inch de la arborele motorului.

$$(6 \text{ și } 10. \times 10 \text{ oz}) + (12 \text{ inch.} \times 8 \text{ oz}) = 156 \text{ inch} \cdot \text{sau o}$$

Din grafic, vom vedea că 156 inch · oz depășește cuplul stand de 100 inch · oz, astfel încât motorul nu va fi capabil de a ridica această sarcină. O soluție la această problemă ar fi introducerea unui tren de viteze, să zicem, 5: 1 între motor și sarcină, [Figura 7.9 litera (d)]. Acum, cuplul necesar motorului este de doar o cincime din ceea ce a fost, sau:

$$\frac{156 \text{ in.} \cdot \text{oz}}{5} = 31.2 \text{ in.} \cdot \text{oz}$$

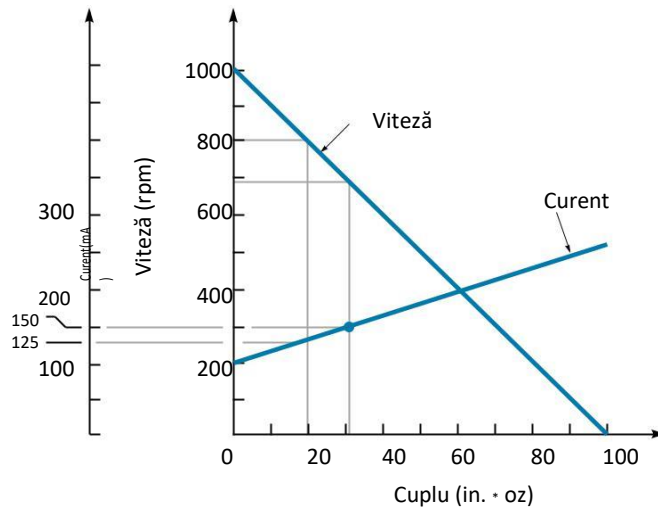
Care se încadrează în intervalul de cuplu al motorului, deci se va roti la 690 rpm și va necesita un curent de 150 mA. Cu toate acestea, din cauza trenului de viteze, sarcina se va roti la doar o cincime din arborele motorului sau

$$\frac{690 \text{ rpm}}{5} = 138 \text{ rpm}$$

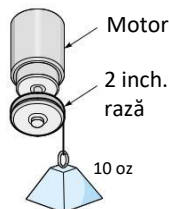
Sarcinile din lumea reală nu sunt întotdeauna constante. În acest caz, acțiunea gravitației face ca sarcina să fie cea mai mare atunci când brațul este orizontal și zero atunci când brațul este vertical, așa că ne-am aștepta ca viteza motorului să crească și să scadă cu fiecare rotație.

Figura 7.9

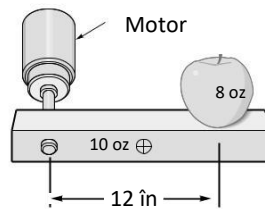
Curba cuplu-turație și configurațiile hardware pentru exemplul 7.4.



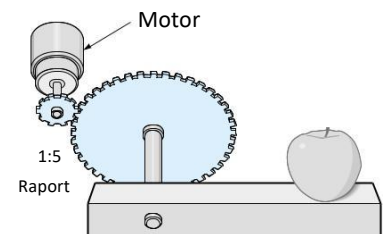
(a)



(b)



(c)



(d)

O singură curbă de turație a cuplului reprezintă performanța motorului pentru o anumită tensiune. Motoarele de control nu sunt de obicei operate la o singură tensiune, deoarece variația tensiunii este o modalitate de a controla puterea (și, prin urmare, viteza). Figura 7.10 prezintă o familie de curbe de turație a cuplului, în care fiecare curbă reprezintă răspunsul motorului pentru o tensiune diferită. Pe măsură ce tensiunea crește, cuplul standului și viteza fără sarcină cresc, de asemenea, dar spunând că viteza crește cu tensiunea este prea simplu. Ceea ce este cu adevărat în creștere este cuplul și, în majoritatea cazurilor, cuplul crescut duce la creșterea vitezei.

EXEMPLUL 7.5

Un mic motor PM este utilizat pe o punte de bandă. În timpul derulării motorul rulează la 500 rpm la 10 V. Pentru a scurta timpul de derulare, dorim ca motorul să funcționeze la 650 rpm. S-a estimat că viteza crescută va crește cuplul de sarcină cu 50%. Pe baza acestei estimări, determinați ce tensiune trebuie aplicată motorului pentru a-l face să funcționeze la 650 rpm (utilizați curba cuplu-turație din figura 7.10).

SOLUȚIE

Pe curba cuplu-turație din figura 7.10, identificați punctul de funcționare existent al motorului pe curba de 10 V la 500 rpm. Motorul furnizează de 8 inch · oz la această viteză și tensiune; pentru o rulare mai rapidă, motorul trebuie să funcționeze la 650 rpm, furnizând 12 in. · oz (12 in. · oz este de 50% mai mare decât 8 inch · oz). Noul punct de operare nu se află direct pe una dintre curbele de tensiune, așa că trebuie să schițăm în unele linii paralele și să estimăm noua tensiune la aproximativ 14 V.

Figura 7.10

O familie de curbe cuplu- turație (Exemplul 7.5).

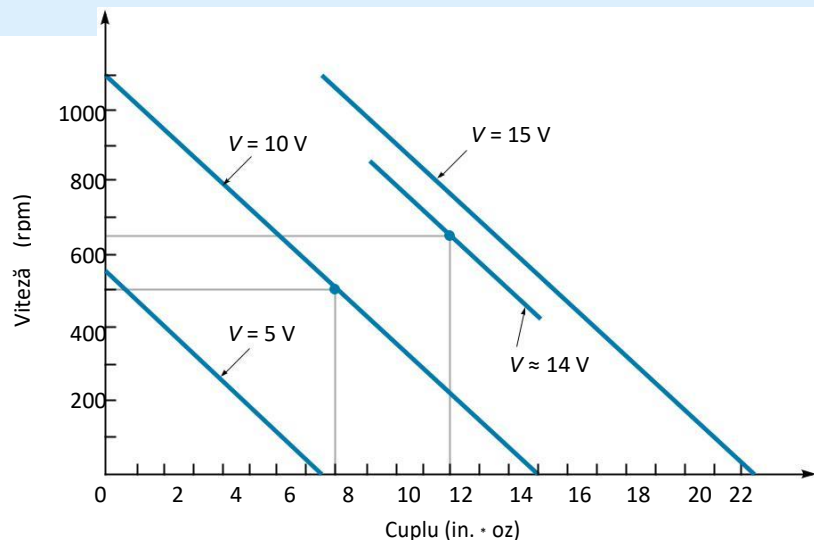


Figura 7.11

Specificații ale
unui motor PM.



BERTSCH U.S. MICROMOTORS

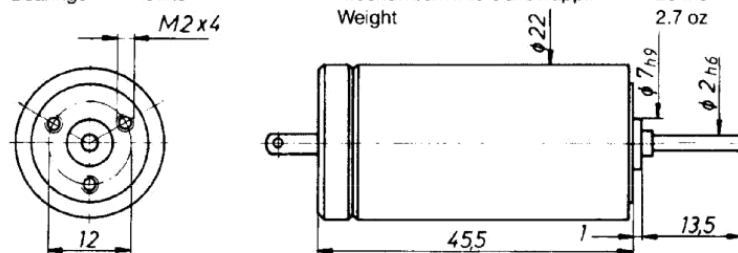
Series 22-45 · 6 Watts · 10,000 RPM

Dimensions – mm 1 mm = 0.0394 in

Magnet	AlNiCo	Efficiency	up to 85 %
Commutator	CuAg 0.1, 5 segments	Rotor Moment of Inertia	20×10^{-3} oz-in ²
Brushes	Graphite	Mechanical Time Const. appr.	20 ms
Bearings	Oilite	Weight	2.7 oz

Possible Combinations

Gear Heads	H 30, H 40, P 24
Tacho	20-08
Encoder	HEDS-5500



Recommended Operational Data

Speed	max. 10,000 rpm
Torque	0.7 oz-in
Temperature	-4° to +175° F

Type	22-45-30	22-45-20	22-45-16	22-45-14	22-45-12	22-45-10	22-45-08	
Voltage	3	6	9	12	18	24	36	V
No load speed	7,500	10,000	10,100	10,000	9,700	9,900	9,700	rpm
Resistance	0.8	2.5	4.5	6	14	28	65	Ohms
Stall torque	1.89	1.80	2.19	3.07	2.95	2.63	2.12	oz-in
No load current appr.	65	55	45	35	25	20	18	mA
Recommended current	1000	800	600	450	300	250	150	mA
Counter-EMF	0.51	0.77	1.15	1.56	2.34	3.15	4.78	mV/rpm
Speed/Torque Gradient	3980	5560	4510	3270	3420	3780	4740	rpm/oz-in

Gear Heads H 30 and H 40 with Oilite Bearings

Standard Gear Ratios

H 30:	20 : 1	60 : 1	200 : 1	600 : 1	2500 : 1	
H 40:	40 : 1	100 : 1	200 : 1	500 : 1	1000 : 1	2000 : 1

Gear Head	H 30	H 40	
Max. torque	30	42	oz-in
Max. Motor Speed	5000	7500	rpm
Max. Power	1	2	W
Max. Axial Load	36	54	oz
Max. Radial Load	36	36	oz
Weight with motor	4.2	5	oz

Figura 7.11 prezintă un exemplu de motor PM "de tip instrument". Acest motor mic (aproximativ 1 inch în diametru) este disponibil în șapte modele de la 3 la 36 V. Luați în considerare modelul 3-V (22-45-30), care are o viteză fără sarcină de 7500 rpm și un cuplu de stand de 1,89 in. · oz [Figura 7.11]. Curba cuplului-turație ar putea fi construită din aceste figuri (a se vedea exemplul 7.6). Acest motor este disponibil cu **angrenaje mici**, care sunt angrenaje

proiectate să se conecteze direct la motor. În acest caz, sunt disponibile rapoarte de transmisie de la 20: 1 la 2000: 1.

EXEMPLUL 7.6

Pentru motorul 22-45-30 [Figura 7.11],

- a. Desenați curba cuplu-turație.
- b. Determinați viteza pentru un cuplu de sarcină de 1 inch · Oz.

SOLUȚIE

- a. Din Figura 7.11, vedem că motorul 22-45-30 are o viteză fără sarcină de 7500 rpm și un cuplu de 1,89 in. · Oz. Pentru a desena curba cuplu-turație, trageți axele și stabiliți o scară adecvată, astfel încât 7500 să fie pe axa y și 1,89 să fie pe axa x. Conectați aceste două puncte cu o linie dreaptă, așa cum se arată în Figura 7.12 (amintiți-vă, numai un motor PM are o linie dreaptă).
- b. Folosind curba cuplu-turație, putem determina acum viteza atunci când motorul livrează 1 inch · oz de cuplu. Din Figura 7.12, vedem că viteza ar fi de 3400 rpm.

Modelul de circuit al motorului PM (opțional)

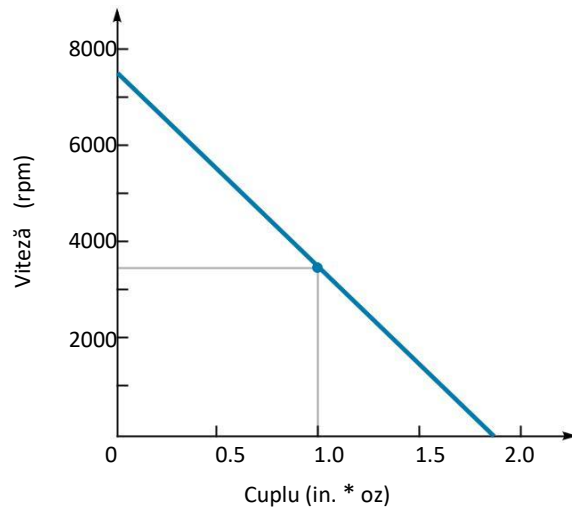
[Notă: Această secțiune poate fi omisă fără a afecta înțelegerea restului acestui capitol.]

Până în prezent am examinat performanța motorului PM și am constatat că acesta depinde atât de condițiile electrice, cât și de cele mecanice prezente. Pentru a sub-suporta *toți* factorii care afectează performanța motorului într-o anumită situație, este util să se testeze un model matematic cuprinzător de sarcină motorie. Acest model este pur și simplu o ecuație, în care fiecare termen reprezintă o condiție electrică sau mecanică. În această secțiune, vom analiza ecuațiile de bază care descriu performanța sistemului motor.

Figura 7.13 prezintă un model simplu al motorului PM care conduce o sarcină mecanică. Circuitul echivalent al motorului este un circuit de serie format dintr-o inductanță (L_A) din înfășurările armăturii, o rezistență (R_A) pentru a ține cont de rezistența la sârmă și comutator și o sursă de tensiune CEMF. Amintiți-vă că CEMF este o tensiune internă care crește odată cu viteza motorului. Polaritatea CEMF este de așa natură încât scade din tensiunea liniei (V_{IN}), creând o tensiune eficientă de armătură. Inductanța (L_A) limitează cât de repede se poate schimba curentul armăturii, dar nu afectează funcționarea în stare stabilă. Scriind ecuația lui Kirchhoff în jurul buclei din Figura 7.13 (pentru starea de echilibru), obținem

Figura 7.12

Curba cuplu-turație
pentru motorul 22-
45-30.



$$V_{In} = (R_A \times I_A) + \text{CEMF}$$

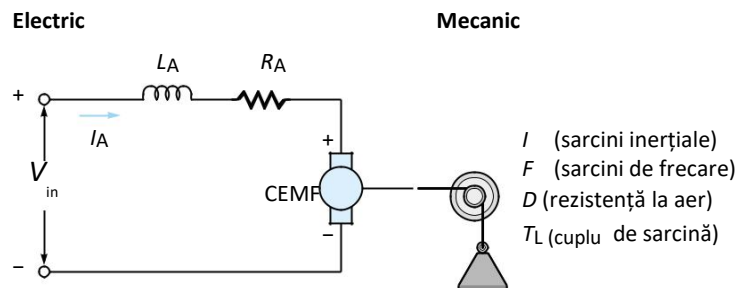
Rezolvarea pentru I_A vom obține

$$I_A = \frac{V_{In} - \text{CEMF}}{R_A} \quad (7.10)$$

Prin urmare, pentru funcționarea în stare stabilă, curentul motorului este direct proporțional cu diferența dintre tensiunea aplicată și MIE. *Valoarea curentului motorului este deosebit de importantă, deoarece parametrul electric este cel care se referă cel mai direct la cuplul mecanic.* Pentru motorul PM, relația dintre cuplu și curent este foarte simplă, așa cum este exprimată în ecuația 7.11 (dată pe pagina următoare).

Figura 7.13

Circuit echivalent al
unui motor PM cu o
sarcină mecanică.



$$T = K' I_A \quad (7.11)$$

unde

T = cuplul mecanic

K' = constanta motorului

I_A = curent de armătură

Motorul, împreună cu sarcina sa, este un sistem mecanic, precum și unul electric. Figura 7.13 indică unii dintre factorii mecanici care vor afecta performanța motorului. Acestea includ **momentul de inerție** (I), frecarea rulmentului (F) și rezistența (D). Dragul, numit *windage*, provine din rezistența aerului pe piesele în mișcare. Toți acești factori determină cupluri de rezistență pe care motorul trebuie să le depășească. Factorul moment de inerție se opune oricărei schimbări de viteză, frecarea rulmentului este o constantă, iar rezistența aerului crește odată cu viteza. Ecuația 7.12 descrie cuplul mecanic pe un motor cu funcționare *liberă*, adică un motor care nu este conectat la nici o sarcină externă:

$$T = (I_m \times \Delta S) + F_m + (D \times S) \quad (7.12)$$

unde

T = cuplul necesar pentru rotirea unui motor fără sarcină

I_m = momentul de inerție al armăturii și arborelui

S = turația motorului

ΔS = variația turației motorului pe unitatea de timp (acelerație)

F_m = frecarea motorului de la rulmenți

D = factorul de rezistență la vânt din rezistența la vânt

Efectul momentului de inerție este prezent numai atunci când viteza motorului crește sau scade. Cu cât factorul I este mai mare, cu atât viteza rezistă mai mult schimbării. În consecință, timpul de răspuns al sistemului este încetinit de momentul inerției, în timp ce viteza în stare stabilă nu este afectată.

Când motorul este conectat la o sarcină externă, un set suplimentar de I_L, F_L și T_L influențează viteza motorului. Sarcina externă va avea cu siguranță propriul moment de inerție și frecare, iar acum există un cuplu de **sarcină** externă (T_L), care este singura lucrare utilă făcută de motor și motivul pentru care acesta este acolo în primul rând. Imaginea matematică completă a ceea ce motorul trebuie să conducă este prezentată în ecuația 7.13:

$$T = (I_M \times \Delta S) + F_M + (D \times S) + (I_L \times \Delta S) + F_L + (D_L \times S) + T_L \quad (7.13)$$

Motor

Încărcătură

unde

I_L = momentul de încărcare al inerției

F_L = frecarea sarcinii

D_L = rezistența la vânt a sarcinii

T_L = cuplu de sarcină (lucru util)

Dacă există un tren de viteze între motor și sarcină, momentul de inerție va fi afectat. În cele mai multe cazuri, motorul este orientat până la sarcină, astfel încât, din punctul de vedere al motorului, valorile de sarcină ale I_L, F_L, D_L și T_L sunt reduse. Pe scurt, performanța reală a motorului este determinată de caracteristicile sale interne și de natura sarcinii.

7.4 CIRCUITE DE CONTROL AL MOTORULUI ÎN CURENT CONTINUU

În această secțiune, discutăm cele două abordări de bază pentru controlul vitezei unui motor de curent continuu. Termenul *de control al vitezei* este oarecum inexact, deoarece, tehnic vorbind, motorul transformă energia electrică în cuplu, nu în viteză (viteza precisă este descurajată atât de cuplul motorului, cât și de sarcina mecanică). Totuși, în general, este sigur să spunem că tensiunea crescută va duce la creșterea vitezei.

Pentru a conduce motorul, este necesar un circuit de interfață pentru a converti semnalul de control al motorului de nivel scăzut de la controler într-un semnal suficient de puternic pentru a rula motorul. Modul clasic de a face acest lucru este cu o **unitate analogică**. În această metodă, un amplificator liniar de putere amplifică semnalul de acționare de la controler și oferă motorului o tensiune analogică "necesară" [Figura 7.14 (a)]. Un DAC (convertor digital-analogic) ar fi necesar dacă controlerul este digital.

Cealaltă tehnică pentru controlul unui motor de curent continuu este **modulația în pulslătime (PWM)**. În acest sistem, puterea este furnizată motorului sub formă de impulsuri de curent continuu de tensiune fixă [Figura 7.14 (b)]. Lățimea impulsurilor este variată pentru a controla viteza motorului. Cu cât impulsurile sunt mai mari, cu atât tensiunea medie dc este mai mare, astfel încât mai multă energie este disponibilă pentru motor. Frecvența impulsurilor este suficient de mare încât inductanța motorului la medie și funcționează fără probleme. Acest sistem are două avantaje față de unitatea analogică: (1) Amplificatorul de putere poate fi de tip C eficient și (2) DAC-ul nu este necesar, deoarece amplificatorul este pornit sau oprit și poate fi condus direct cu un semnal digital.

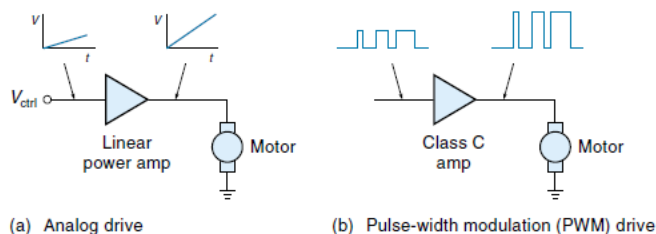


Figura 7.14

Metode de control al vitezei pentru motoarele de curent continuu.

Controlul motorului DC utilizând o unitate analogică

Sistemul de acționare analogică al controlului motorului de curent continuu utilizează un amplificator de putere liniară pentru a conduce motorul. Amplificatorul este interfața dintre controler și motor. De obicei, este un amplificator de curent, ceea ce înseamnă că funcția sa principală este de a stimula curentul; tensiunea de ieșire poate fi sau nu mai mare decât tensiunea de intrare.

Cel mai simplu circuit de acționare analogică este un amplificator de clasă A care utilizează un singur tranzistor de putere. Circuitul ar putea să fie în configurația *emițătorului comun* (CE), care oferă câștig de curent și tensiune, fie configurația colectorului *comun* (CC), care oferă doar câștig de curent; aceste circuite sunt prezentate în figura 7.15. Funcționarea ambelor circuite este similară; când tensiunea de bază (V_B) este crescută (dincolo de tensiunea de deschidere), tranzistorul începe să se pornească și să lase curentul colector (I_C) să curgă. Curentul colector este de 30-100 de ori mai mare decât curentul de bază, în funcție de câștigul (h_{fe}) al tranzistorului. Odată ce tranzistorul începe să conducă, I_C crește cu V_B mai mult sau mai puțin liniar. Rețineți că tot I_C trece prin motor, oferind curentul de acționare.

Problema cu acest aranjament este că amplificatoarele de clasă A sunt foarte ineficiente. Luați în considerare cazul unui motor de 12-V, 2-A conectat așa cum se arată în figura 7.16 litera (a). Puterea de curent continuu disponibilă este de 12 V. Când tranzistorul este pornit, acesta acționează ca un comutator închis, astfel încât întregul 12 V este aplicat pe motor. Când tranzistorul este pe jumătate, acesta acționează ca un rezistor în serie cu motorul, reducând I_C cu o jumătate, în acest caz la 1 A. Acum, doar 6 V este aplicată motorului, iar restul de 6 V este aplicată tranzistorului. Puterea care se extrage din sursa de alimentare este

$$P = IV$$

$$= 1 \text{ A} \times 12 \text{ V} = 12 \text{ wați (W)}$$

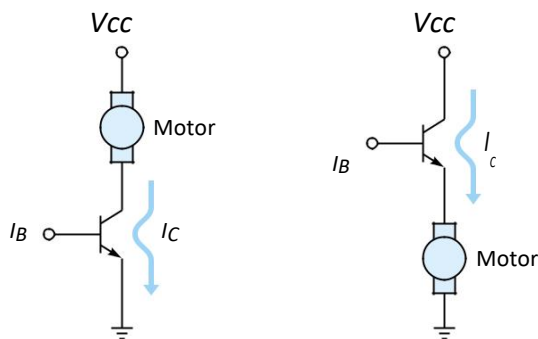
întrucât puterea disipată de tranzistor este

$$P = VI$$

$$= 6 \text{ V} \times 1 \text{ A} = 6 \text{ W}$$

Figura 7.15

Configurații de ieșire cu acționare analogică pentru un motor de curent continuu (debit de curent convențional).

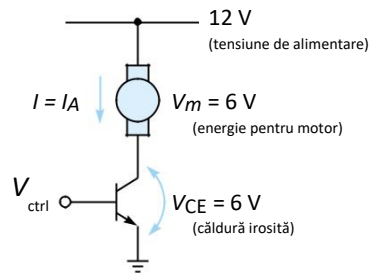


(a) Emițătorul comun

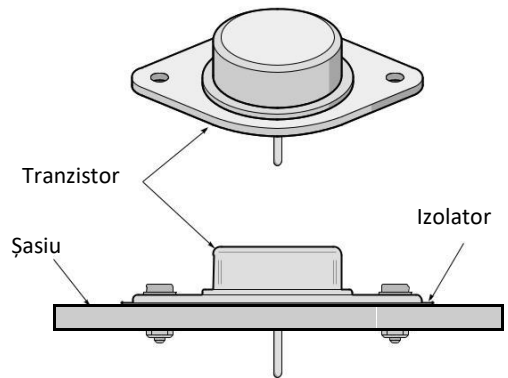
(b) Colector comun

Figura 7.16

Tranzistoare de putere.



(a) Condiții de circuit atunci când tranzistorul este polarizat cu $V_{ce}=6V$



(b) Montarea tranzistorului de putere

Jumătate din puterea (6 W) a acestui sistem este irosită sub formă de căldură de către tranzistor atunci când motorul funcționează la jumătate de viteză. În multe sisteme de control, motorul poate funcționa cu o viteză medie de chiar mai puțin de jumătate. Pentru motoarele mai mici, aceste pierderi pot fi acceptabile, dar pentru motoarele mai mari este necesară o aranjare mai eficientă.

Circuitul descris doar folosește un tranzistor de putere ca amplificator conducătorului auto motor. După cum se arată în figura 7.16 litera (b), tranzistorii de putere și alte circuite ale șoferului de putere sunt realizate astfel încât să poată fi montate în siguranță pe șasiu. Scopul montării este de a oferi o cale pentru ca căldura să fie disipată. Un tranzistor de putere care nu este montat (sau montat incorect) nu poate manipula oriunde în apropierea puterii sale nominale. Tranzistorii de putere tipici pot transporta până la 60 A și se pot disipa până la 300 W, iar modelele speciale pot merge mult mai sus. (Tranzistoarele de putere și considerațiile privind căldura sunt acoperite în detaliu în capitolul 4.) Alte drivere de motor în afară de tranzistorul de putere includ IC de putere, tranzistorul de putere Darlington și MOSFET-ul de putere; acestea sunt descrise în continuare.

Driverul de putere este un amplificator DC încapsulat, cu o ieșire de curent relativ mare. Un exemplu este LM12 (National Semiconductor) prezentat în Figura 7.17. Acest

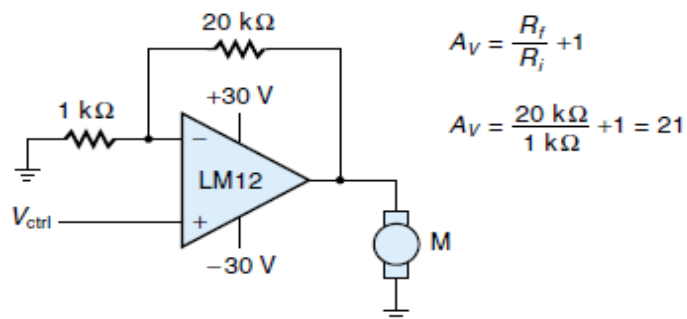
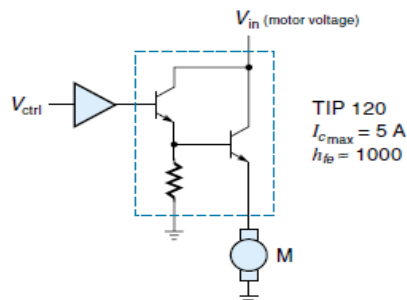


Figura 7.17

Amplificator operațional de putere LM12 (National Semiconductor).

Figura 7.18 Acționarea unui motor de curent continuu folosind un Tranzistor Darlington.



amplificatorul operațional de mare putere poate furniza până la 13 A cu o tensiune maximă de ± 30 V. Ca în orice circuit amplificator operațional, rezistoare de feedback sunt adăugate pentru a regla câștigul la orice valoare dorită. Câștigul de tensiune pentru circuitul din Figura 7.17 este 21 [$A_v = (R_f / R_i) + 1$].

Figura 7.18 prezintă un circuit motor-driver folosind un tranzistor Darlington de putere. Configurația Darlington constă din două amplificatoare CC conectate astfel încât primul tranzistor să-l conducă direct pe al doilea. Deși câștigul de tensiune este de numai 1 (maxim), câștigul de curent poate fi foarte mare. Tranzistorul prezentat în figura 7.18 este un TIP 120, care are un câștig de curent (h_{fe}) de 1000 și un curent maxim de ieșire de 5 A. Motorul trebuie plasat în calea emițătorului tranzistorului de ieșire. Un amplificator separat de semnal mic, probabil un amplificator operațional, ar fi necesar pentru a oferi orice câștig de tensiune necesar.

Un alt dispozitiv capabil să furnizeze unitate analogică pentru un motor este MOS-FET de putere, cunoscut sub nume precum VFET, TMOS și HEXFET. Forma construcției sale permite curenți mari [Figura 7.19 litera (a)]. Aceste FET-uri sunt de obicei concepute pentru a funcționa în modul de îmbunătățire, ceea ce înseamnă că tensiunea de deschidere este întotdeauna fixată.

Figura 7.19

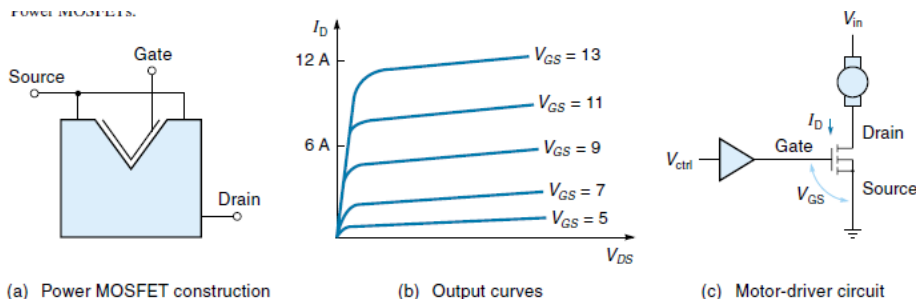


Figura 7.20

Rotirea motorului de mers înapoi cu tensiune negativă (curent convențional).

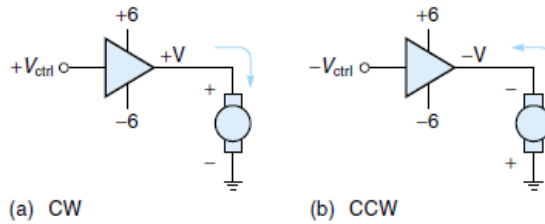
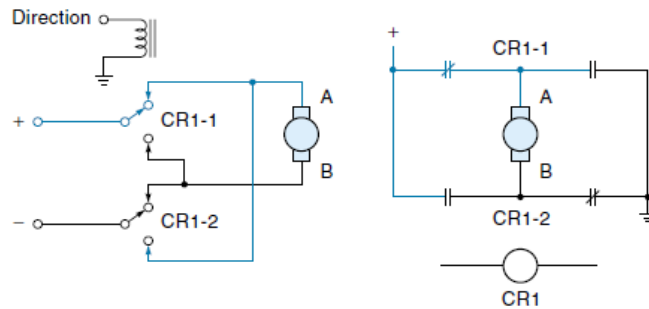


Figura 7.19 (b) prezintă un set tipic de curbe pentru MOSFET-ul de putere. Observați că curentul de ieșire (I_D) este 0 A atunci când tensiunea de intrare (V_{GS}) este în intervalul 0-5-V, dar apoi urcă la 12 A când V_{GS} se ridică la 13 V. Figura 7.19 (c) arată un circuit de bază motor-driver folosind un MOSFET de putere. În acest caz, motorul este în serie cu scurgerea, ceea ce înseamnă că FET va oferi atât tensiune, cât și câștig de curent. Tensiunea porții este furnizată de la un circuit amplificator operațional care este proiectat pentru a interfața controlerul cu FET.

Motorul PM – inversarea vitezei de rotație

Pentru a inversa direcția de rotație a motorului PM, polaritatea tensiunii aplicate trebuie inversată. O modalitate de a realiza acest lucru este de a avea un amplificator motor-driver capabil de a produce o tensiune pozitivă și negativă (Figura 7.20). Când tensiunea de acționare este poziționată în raport cu masa, motorul se rotește în sensul acelor de ceasornic (CW). Când tensiunea de acționare este negativă în raport cu masa, polaritatea tensiunii la bornele motorului se inversează, iar motorul se rotește în sens invers acelor de ceasornic (CCW). Amplificatorul operațional de putere LM12 (Figura 7.17) este capabil să furnizeze tensiuni de ieșire pozitive și negative.

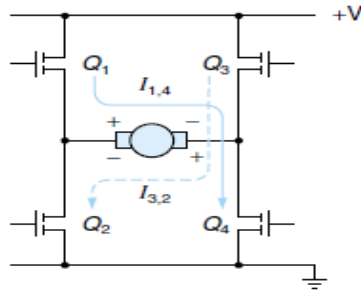
În multe aplicații, amplificatorul de acționare nu poate produce atât tensiuni pozitive, cât și negative, caz în care trebuie adăugat un circuit de comutare pentru a inversa motorul. O abordare este utilizarea unui releu cu poli dublu (Figura 7.21). Când contactele releului sunt în sus, tensiunea pozitivă este conectată la terminalul A al motorului și terminalul B este conectat

**Figura 7.21**

Inversarea sensului de rotație al unui motor cu comutare prin releu (două reprezentări schematice).

Figura 7.22

Schimbare sensului de rotație
A unui motor DC folosind
Relee solid-state.



la tensiunea negativă. Când contactele releului sunt în jos, tensiunea pozitivă este conectată la terminalul B, iar terminalul A merge la tensiunea negativă, inversând astfel în mod eficient polaritatea.

Comutarea înainte-inversă se poate face și cu dispozitive SSD. Figura 7.22 prezintă un circuit de mers în marșarier cu motor care utilizează patru TT-uri. Când Q₁ și Q₄ sunt pornite, curentul $I_{1,4}$ determină motorul să se întoarcă în sensul acelor de ceasornic.

Când Q₂ și Q₃ sunt pornite, curentul $I_{3,2}$ curge în direcția opusă și determină motorul să se întoarcă în sens invers acelor de ceasornic. Întreaga operațiune de comutare poate fi efectuată de un singur IC, cum ar fi Allegro A3952 prezentat în figura 7.23. Acest IC conține patru tranzistoare separate care sunt controlate de logica internă pentru a funcționa în perechi (în modul din figura 7.22). A3952 controlează o tensiune de alimentare a motorului de până la 50 V cu până la 2 A de curent de ieșire.

Figura 7.23

Un driver de motor
PWM full-bridge.

A3952SB

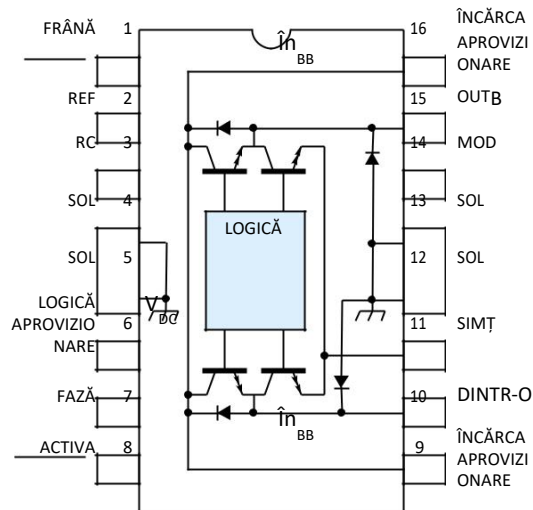
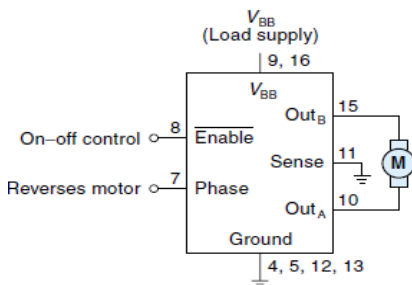


Figura 7.24

Mod de ulizare
Allegro A3952.



A3952 este foarte simplu de utilizat, după cum se arată în figura 7.24. Practic, IC conectează tensiunea de alimentare (V_{BB}) și la masă și la motor prin Out_A și Out_B . Polaritatea tensiunii motorului (adică direcția motorului) este controlată de intrarea de fază, iar intrarea Enable poate fi utilizată pentru a porni și opri motorul. Atât intrările Phase cât și Enable sunt semnale digitale compatibile TTL.

Controlul motorului DC folosind modulația în puls

Modulația puls-lățime este o abordare complet diferită pentru controlul cuplului și vitezei unui motor de curent continuu. Puterea este furnizată motorului într-un semnal dreptunghiular, dar variind lățimea pulsului sau ciclul de funcționare. **Ciclul de funcționare** se referă la centajul de timp în care pulsul este ridicat (pe ciclu). Figura 7.25 prezintă formele de undă pentru patru viteze diferite. Pentru cea mai lentă viteză, puterea este furnizată doar pentru un sfert din durata ciclului (ciclu de funcționare de 25%). Frecvența impulsurilor este setată suficient de sus pentru a se asigura că inerția mecanică a armăturii va netezi impulsurile de putere, iar motorul se rotește pur și simplu la o viteză constantă de aproximativ un sfert de viteză. Pentru un ciclu de funcționare de 50% (putere pe o jumătate din timp), motorul funcționează la aproximativ jumătate de viteză și așa mai departe. În viața reală, factorii neliniari determină motorul să meargă mai lent

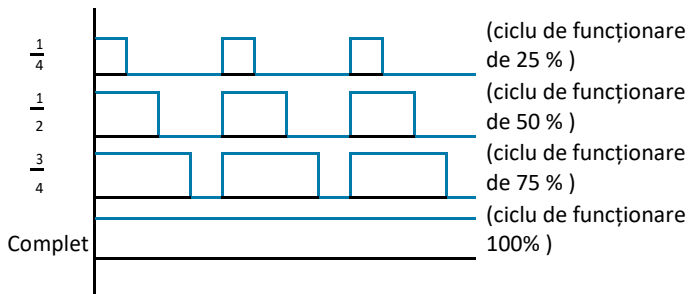


Figura 7.25

Forme de undă
PWM.

proporțiile sugerează, dar principiul încă mai există - adică viteza unui motor poate fi reglată prin pulsarea puterii.

PWM oferă două avantaje distincte față de unitatea analogică. În primul rând, este de natură digitală, puterea este fie pornită, fie oprită, astfel încât să poată fi controlată direct de pe un microcontroler, eliminând necesitatea unui DAC. În al doilea rând, amplificatorul de acționare poate utiliza o funcționare eficientă de clasă C. Amplificatorul de clasă C este eficient deoarece condițiile care cauzează disiparea puterii sunt reduse la minimum. Luați în considerare circuitul prezentat în Figura 7.26. Un control tensiune (V_{ctrl}) de 2 V va porni Q_1 tot drumul (saturație), și I_C curge liber prin motor. Adică, Q_1 acționează ca un comutator închis, făcând V_{CE} aproape de 0 V și astfel cădere întreaga tensiune a liniei (V_{In}) peste motor. Putem calcula puterea disipată de tranzistor folosind ecuația de putere: $P = I_C V_{CE}$. Aplicarea acestui lucru la Q_1 ,

$$P = I_C \times V_{CE}$$

Dacă V_{CE} este aproape de 0 V, atunci

$$P = I_C \times 0 \text{ V} = 0 \text{ W}$$

Acest lucru ne spune că aproape nici o putere nu este pierdută pe tranzistor atunci când am_C este curge. Pe

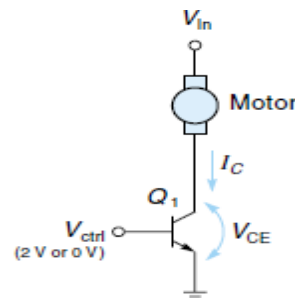
pe de altă parte, când V_{ctrl} este 0 V, Q_1 este oprit complet, reducând astfel I_C la aproape 0 A. Recalculând puterea în aceste condiții,

$$P = 0 \text{ A} \times V_{CE} = 0 \text{ W}$$

Din nou, teoretic nici o putere nu este disipată de tranzistor. Prin urmare, dacă tranzistorul este operat corect, avem un amplificator foarte eficient. Aceasta este modul de clasă C și poate fi utilizată pentru PWM. În practică, tranzistorii de comutare au pierderi din cauza scurgerilor și pentru că nu pot porni (sau opri) instantaneu. Prin urmare, o mică disipare are loc cu fiecare tranziție, ceea ce înseamnă că cu cât frecvența este mai mare, cu atât tranzistorul devine mai fierbinte!

Figura 7.26

Amplificator în clasă C folosind un tranzistor de putere.



Circuitul amplificatorului de driver utilizat pentru PWM este în esență același ca și pentru o unitate analogică. Tranzistorul de putere, Darlingtonul de putere, MOSFET-ul de putere și amplificatorul IC de putere pot fi utilizate. O diferență importantă față de unitatea analogică este că amplificatoarele PWM nu trebuie să fie liniare; acest lucru tinde să facă amplificatorul PWM mai puțin complicat. Circuitul este proiectat astfel încât amplificatorul să fie în mod normal oprit. Semnalul de intrare va arăta ca cel prezentat în Figura 7.25. Magnitudinea de intrare trebuie să fie suficient de mare pentru a se asigura că va porni în timpul impulsurilor. Dacă nu, ineficiența rezultată poate provoca eșecul amplificatorului prin supraîncălzire.

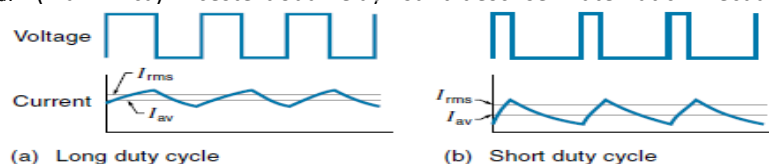
Allegro A3952 (figurile 7.23 și 7.24) este ideal pentru a oferi o unitate PWM. Terminalul de alimentare cu sarcină (V_{BB}) este conectat la o sursă de curent continuu și oferă motorului tensiunea necesară. O formă de undă PWM de nivel TTL (cum ar fi în figura 7.25) este conectată direct la intrarea Activare. Amintiți-vă că intrarea Enable pornește și oprește tensiunea motorului.

Unele probleme sunt asociate cu puterea pulsantă la un motor de curent continuu. De fapt, noi încercăm să evităm pornirea și oprirea rapidă cu o sarcină inductivă ca un motor din cauza pulsurilor de tensiune mare generate atunci când curentul prin înfășurarea întreruptă nu merge. Recunoscând această problemă, circuitul PWM include *diode* sau *flyback* pentru a oferi o cale de întoarcere nedistructivă pentru curent. Figura 7.23 prezintă patru diode flyback - câte una pentru fiecare tranzistor. De fiecare dată când tensiunea este oprită la motor, va apărea un vârf de tensiune scurtă la bornele motorului. Diodele redirecționează această energie înapoi în sursa de alimentare.

Deoarece curentul unității PWM nu este o valoare DC constantă, apare un tip unic de ineficiență, pe care unitatea analogică nu o are. Figura 7.27 prezintă tensiunea de intrare și curentul PWM pentru două cicluri de funcționare diferite. Observați că forma de undă actuală arată mai mult ca un ferăstrău decât un o undă dreptunghiulară. Curentul încearcă să urmeze forma undei de tensiune, dar inductanța motorului restricționează curentul să se schimbe foarte repede. Pe măsură ce impulsurile devin mai scurte, valoarea relativă de vârf la vârf a curentului crește. Ca orice formă de undă periodică, această formă de undă curentă are atât o valoare medie (I_{av}) cât și o valoare rms (I_{rms}), dar rețineți că diferența dintre cele două valori devine mai mare pe măsură ce impulsurile devin mai scurte. Aici intervine ineficiența deoarece pierderile de căldură ale armăturii sunt proporționale cu valoarea (mai mare) I_{rms} , iar cuplul mecanic al motorului este proporțional cu valoarea I_{av} (mai mică). Aceste două relații sunt descrise matematic în ecuațiile 7.14 și 7.15.

Figura 7.27

Diferența de I_{ave} și I_{RMS} pe comandă PWM.



$$T = I_{av} \times K_t \quad (7.14)$$

unde

T = cuplul motorului

I_{av} = curentul mediu de armătură

K_t = constanta motorului

$$P_d = I_s^{2Rm} \times R_{un} \quad (7.15)$$

unde

P_d = putere disipată prin armătură

I_{rms} = valoarea componentei rms a curentului

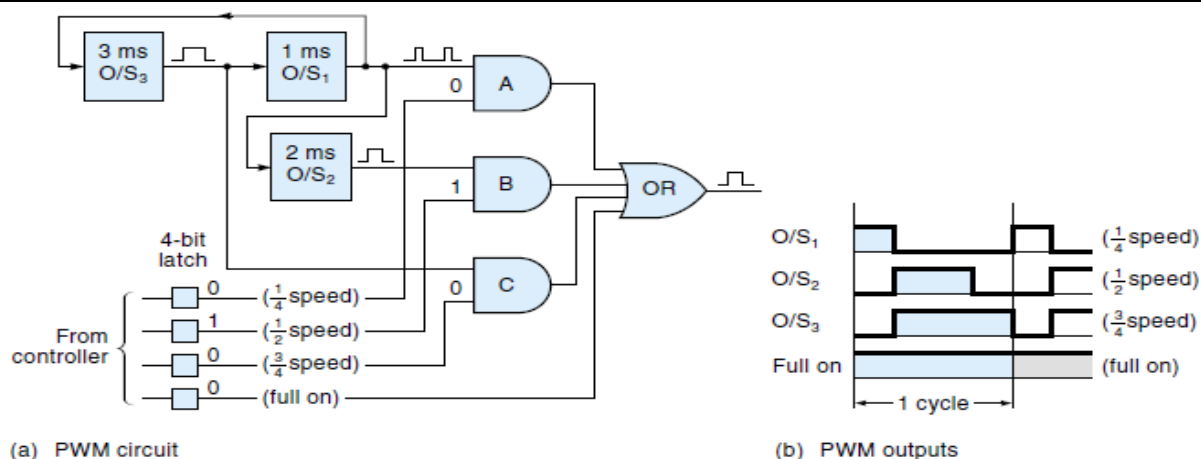
R_o = rezistența armăturii

Pe scurt, pe măsură ce impulsurile PWM devin mai scurte, componenta I_{rms} devine proporțional mai mare, la fel ca și pierderile de armătură. Implicația aici este că turații lente ale motorului necesită ca ciclul de funcționare să fie mai mult decât o simplă proporție; de exemplu, pentru o viteză de 25%, ciclul de funcționare ar putea fi necesar să fie de 35%.

Circuite de control PWM

Există multe modalități de a crea forma de undă PWM, folosind fie circuite electronice, fie software. Cu toate acestea, pentru a nu împovăra procesorul principal cu o astfel de sarcină repetitivă, PWM este de obicei generat cu circuite dedicate sau cu circuite speciale programabile de timing încorporate în microcontroler. În această secțiune, examinăm câteva metode diferite care pot fi utilizate pentru a produce PWM. În toate modelele, ciclul de funcționare, nu frecvența, este cel care determină viteza motorului. Frecvența rămâne constantă și este de obicei în intervalul de 40 Hz-10 kHz. Frecvențele mai mici pot provoca uneori vibrații, iar transferul de putere către motor scade la frecvențe mai mari datorită reacției inductive a înfășurărilor armăturii.

Figura 7.28 prezintă un circuit de control PWM cu 4 trepte. Funcționarea circuitului este după cum urmează: Două circuite, O / S_1 și O / S_3 , sunt conectate împreună pentru a forma un oscilator. (Se generează un singur puls atunci când este declanșat.) 3-ms one-shot declanșează 1-ms one-shot, care se duce înapoi și declanșează 3-ms one-shot, și așa mai departe. Ieșirea acestui circuit este o serie de impulsuri care sunt mari (5 V) pentru 1 ms și scăzute pentru 3 ms. Forma de undă pentru $\frac{1}{4}$ din viteză este prezentată în figura 7.28 (b). Rețineți că perioada de bază a formei de undă a fost stabilită la 4 ms. Un al doilea circuit (O / S_2) creează un puls de 2 ms și este declanșat de "marginea care se încadrează" a ieșirii O / S_1 . Pulsul furnizat de O / S_2 este mare pentru o jumătate din perioada de 4 ms și este prezentată ca forma de $\frac{1}{2}$ din viteză prezentată în figura 7.28 (b). Luând ieșirea 3-ms O / S_3 , creăm o formă de undă de $\frac{3}{4}$ din viteză așa cum se arată. Porțile de control A, B și C permit trecerea a unuia dintre cele trei semnale în poarta OR. Un al patrulea semnal în poarta OR numit "full on" (ciclul de funcționare = 100%) furnizează toată tensiunea direct la motor. Semnalele de control ar putea veni direct de la computer. Computerul ar trimite doar un cuvânt de date pe 4 biți la un port de ieșire bufferat, cu un 1 în poziția de biți a vitezei dorite. Motorul ar funcționa cu acea viteză până când va fi trimisă o nouă comandă.

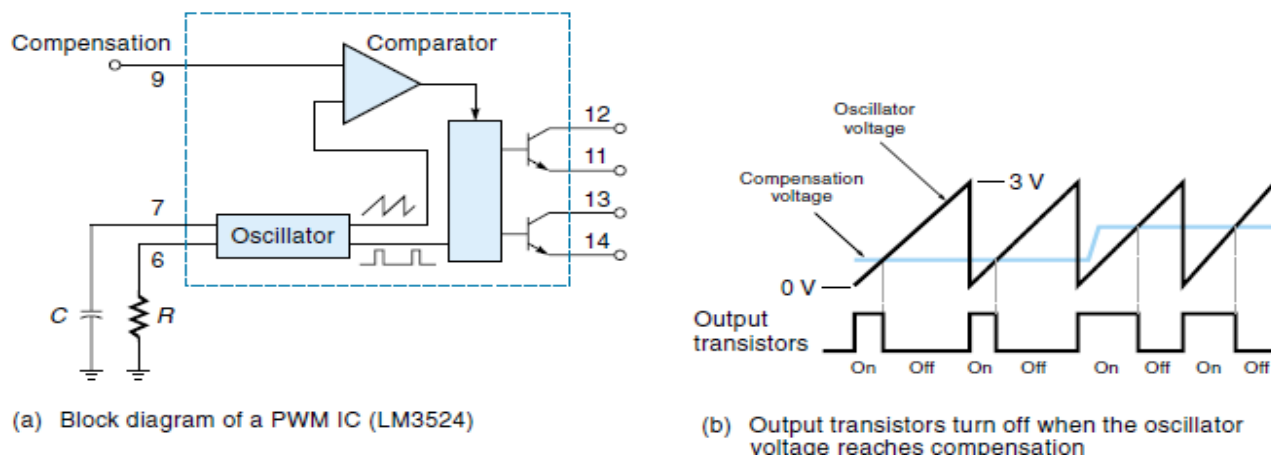
**Figura 7.28**

Circuit pentru un control al motorului PWM cu 4 trepte (afișat cu selecție cu 1/2 trepte).

Unele circuite integrate pot genera direct forma de undă PWM. Un astfel de dispozitiv este LM3524 (National Semiconductor) prezentat în diagrama bloc din figura 7.29 (a). Ciclul de funcționare poate fi variat de la 0% la aproape 100% prin aplicarea unei tensiuni DC numită "compensare" pe pinul 9. Un oscilator de bord stabilește frecvența PWM sub forma unei forme de undă în formă de dinți de fierăstrău (frecvența poate fi ajustată cu un R și C extern). Această formă de undă a ferăstrăului este comparată cu tensiunea de compensare într-un comparator

Figura 7.29

Modulația PWM cu IC (LM3524).



. La începutul fiecărui ciclu, tranzistorul de ieșire este pornit; atunci când tensiunea de ferăstrău se ridică la valoarea tensiunii de compensare, tranzistorul de ieșire se oprește și rămâne oprit pentru restul ciclului [Figura 7.29 (b)]. Pe măsură ce tensiunea de compensare este crescută, tranzistorul de ieșire rămâne mai mult timp, crescând ciclul de funcționare.

Una dintre cele mai comune modalități de a produce PWM este cu hardware programabil încorporat în microcontroler. De exemplu, PWM poate fi generat din microcontrolerul MC68HC11 prin încărcarea a două numere în registre corespunzătoare timpului ridicat și timpului redus al fiecărui ciclu. Ieșirea PWM este setată la un nivel scăzut în timp ce un contor de mare viteză contorizează până la valoarea din registrul de timp redus, apoi ieșirea este setată mare în timp ce contorul contează până la valoarea din registrul de mare timp. Lucrați în întreruperi (programate) aveți grijă de întregul proces PWM, astfel încât microcontrolerul să fie liber să facă alte lucruri. Alte microcontrolere, cum ar fi MC68HC05B6, vin cu canale PWM încorporate. Fiecare canal poate fi inițializat pentru o anumită perioadă și ciclul de funcționare, apoi hardware-ul preia și produce und PWM. În cazul în care programul de aplicare trebuie să schimbe ciclul de funcționare, o nouă valoare este pur și simplu scrisă în registrul ciclului de funcționare.

Figura 7.30 arată un microcontroler MC68HC05B6 (Motorola) utilizat pentru a conduce PWM furnizat la un motor de curent continuu. Ieșirea microcontrolerului este un semnal logic 0-5-V care trebuie amplificat pentru a furniza curentul motor necesar. În acest caz, se va folosi un A3952 (discutat mai devreme). Observați că semnalul PWM merge la intrarea de activare și semnalul care specifică direcția motorului merge la intrarea de fază.

Controlul motorului DC pentru motoare mai mari

Motoarele de curent continuu vin în toate dimensiunile, de la motoare pentru instrumente mici care necesită o fracțiune dintr-un amper până la motoare industriale mari care necesită sute de amperi. Discuția de până acum a presupus că era disponibilă o tensiune de alimentare cu curent continuu și că tot circuitul de control trebuia să o producă, în linii mari, a fost să conecteze această tensiune la motor. Pentru motoarele mai mari - să zicem, 20 A sau mai mult - hardware-ul necesar pentru a furniza curent continuu devine voluminos și scump. O soluție alternativă este de a conduce motorul de curent continuu cu AC redresat, în cazul în care nu se face nici o încercare de a netezi forma de undă. Un dispozitiv care este utilizat frecvent în această aplicație pentru a oferi atât redresare, cât și o anumită măsură de control este **redresorul cu siliciu (SCR)**, care este prezentat în detaliu în capitolul 4. Următorul paragraf este doar un rezumat al operațiunii SCR.

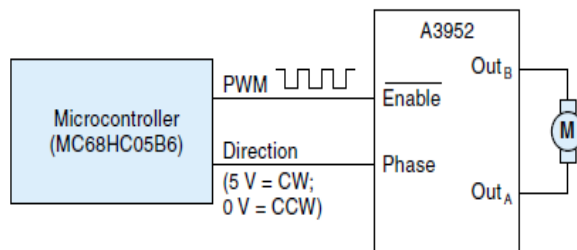


Figura 7.30

Controlul unui motor de curent continuu cu PWM (de la un microcontroler).

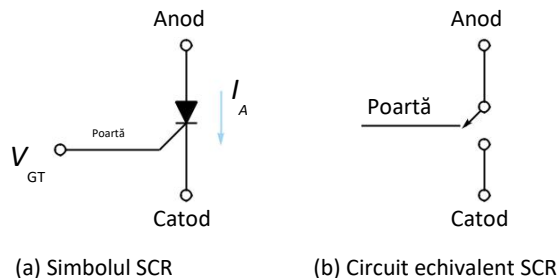


Figura 7.31

Utilizarea unui redresor controlat cu siliciu.

SCR este un membru al familiei de tiristoare - dispozitive de comutare semiconductoare. Figura 7.31 litera (a) prezintă simbolul SCR, care are trei terminale: anod, poartă și catod. SCR este folosit ca un comutator electronic și poate gestiona curenți de până la peste 100 A. Acest curent de putere (I_A) curge de la anod la catod, așa cum se indică în figura 7.31 litera (a). SCR este pornit prin aplicarea unei tensiuni scăzute la poarta (V_{GT}), care este de obicei 0.6-3 V. Odată pornit, acesta rămâne pornit, chiar dacă tensiunea porții este îndepărtată. De fapt, singura modalitate de a-l opri este de a reduce curentul de putere (I_A) sub un prag scăzut numit curentul **de reținere**, care este de obicei câteva miliamperi. Observați că simbolul SCR este similar cu cel al unei diode, ceea ce ne reamintește că SCR este un redresor, precum și un comutator - adică curentul poate curge prin el într-o singură direcție.

Figura 7.32 litera (a) prezintă circuitul de bază SCR de control al motorului. Observați că sursa de alimentare este AC monofazat și că motorul de curent continuu este conectat în serie cu SCR. Poarta SCR este acționată de un circuit de declanșare care oferă un puls pentru fiecare ciclu al curentului alternativ. Dioda cu roți libere (D) de peste motor oferă o cale de evacuare pentru energia stocată în înfășurările motorului atunci când SCR se oprește.

Figurile 7.32 literele (b) și (c) arată modul în care circuitul poate controla viteza motorului. Forma de undă superioară din figura 7.32 litera (b) este puterea de curent alternativ. Observați că tensiunea motorului (V_M) rămâne la 0 V până când pulsul de declanșare (V_t) pornește SCR-ul. Odată pornită, tensiunea motorului este egală cu tensiunea de curent alternativ pentru restul jumătății pozitive a ciclului. În timpul

Figura 7.32

Controlul motorului de curent continuu de la o sursă de curent alternativ folosind un SCR.

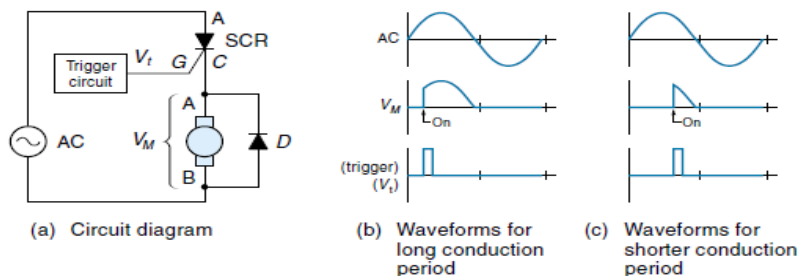
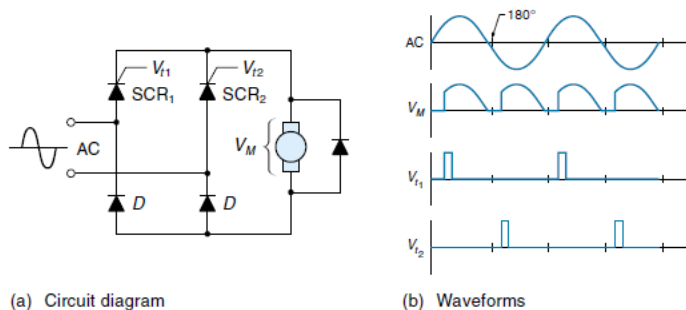


Figura 7.33

Un circuit de control al motorului DC cu undă completă folosind mai multe SCR-uri.



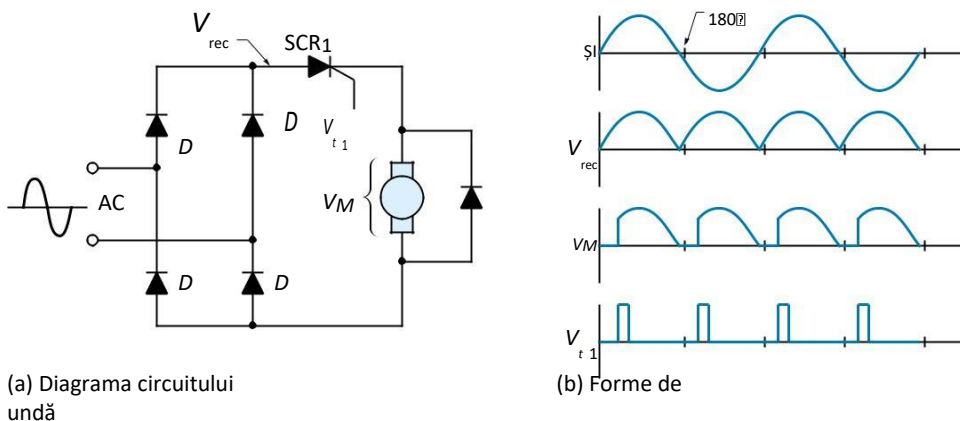
jumătății negative a ciclului de curent alternativ, SCR rămâne oprit și nu există putere pentru motor. Figura 7.32 (b) arată că motorul primește aproape toată puterea pe care o poate furniza acest circuit, care este încă doar aproximativ jumătate din puterea de curent alternativ disponibilă.

În figura 7.32 litera (c), pulsul declanșator este întârziat de la ceea ce a fost în figura 7.32 litera (b). Prin urmare, motorul nu este conectat la puterea de curent alternativ decât mai târziu în ciclu și, consecvent, primește și mai puțină putere - adică rulează mai lent. Deci, prin controlul timpului de întârziere al pulsului de declanșare, putem controla viteza motorului.

Un circuit cu un SCR este un redresor cu jumătate de undă, astfel încât sarcina primește maximum jumătate din puterea disponibilă. Circuitele care utilizează mai multe SCR-uri pentru a crea un redresor cu undă completă depășesc această problemă. Figura 7.33 prezintă un astfel de circuit. Aici, SCR₁ este declanșată de jumătatea pozitivă a ciclului ac, iar SCR₂ este declanșat în timpul jumătății negative. Rezultatul? Motorul primește două impulsuri de putere pe ciclu. Figura 7.34 prezintă un alt circuit de control al motorului cu undă completă. În acest caz, patru diode sunt utilizate pentru redresorul cu undă completă, iar un singur SCR controlează întârzierea fiecărei jumătăți de ciclu.

Figura 7.34

Utilizarea unui SCR pentru controlul motorului folosind o punte de diode.



Circuitele SCR descrise până acum sunt declanșate undeva la mijlocul jumătății pozitive a ciclului AC pozitiv. Creșterea bruscă a tensiunii rezultată generează armonici de înaltă frecvență cunoscute sub numele de "zgomot" electric, care pot provoca interferențe cu alte circuite, cum ar fi cu radioul și televizorul. O soluție la această problemă se numește comutare la tensiunea zero. Cu **comutarea de tensiune zero**, SCR este declanșată *numai la începutul ciclului*, când tensiunea este oricum zero; în consecință, nu există nici o schimbare rapidă de tensiune. Dacă se dorește mai puțin de putere maximă, atunci, de exemplu, doar trei din patru cicluri ar fi declanșate (sau un alt raport). Comutarea de tensiune zero necesită un circuit de declanșare mai sofisticat decât circuitul de schimbare a fazei discutat până acum.

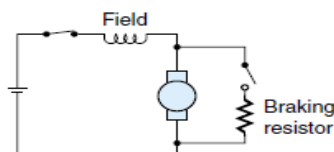
Motoarele electrice au un curent de pornire mare, care este de multe ori mai mare decât curentul de rulare. Pentru motoarele mai mici, acest lucru nu poate prezenta o problemă; pentru motoarele mai mari (pe intervalul de 1-2 CP), cu toate acestea, se utilizează circuite speciale **de pornire cu tensiune redusă**. Un circuit redus de pornire a tensiunii va limita curentul armăturii la o anumită valoare acceptabilă atunci când motorul pornește. O modalitate de a face acest lucru este de a avea un rezistor în serie cu armatura. După ce motorul vine la viteză, un releu este folosit pentru a ocoli rezistorul, care să permită tensiunea de linie completă la motor.

Frânarea motorului de curent continuu

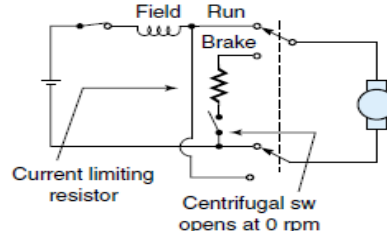
Există unele aplicații care necesită motorul pentru a opri mai repede decât ar fi în cazul în care doar i se taie alimentarea. Desigur, o modalitate de a opri rotația rapid este prin utilizarea unei unități de frână externe de frecare, așa cum se discută în capitolul 5. Alte metode de frânare folosesc hardware-ul existent al motorului pentru a crea un cuplu de rezistență. O astfel de metodă, numită **frânare dinamică**, folosește faptul că un motor devine generator atunci când puterea este îndepărtată. După cum se arată în figura 7.35 litera (a), atunci când înfășurările armăturii sunt comutate la un rezistor pe măsură ce motorul coboară în jos, curentul "generat" de la motor furnizează putere rezistorului, care disipează puterea ca căldură. Puterea de a încălzi rezistorul trebuie să vină de undeva, iar în acest caz vine de la

Figura 7.35

Circuite de frânare pentru motorul de curent continuu.



(a) Dynamic braking using a braking resistor



(b) Braking by reversing polarity (plugging) DPDT run/brake sw shown in "run" position.

inertția mecanică a arborelui motorului, astfel încât cu cât mai multă putere este disipată de rezistor, cu atât mai repede arborele se va opri. Amintiți-vă că puterea disipată într-un rezistor este egală cu curentul *pătrât* ori rezistența ($P = I^2 \times R$), care indică că puterea este mai mult influențată de o schimbare a curentului decât de o schimbare a rezistenței. Astfel, acțiunea de frânare poate fi mărită prin permiterea unui curent mai mare prin rezistor, ceea ce se face prin a face rezistența mai mică. Rețineți că acest sistem poate fi utilizat atât în motoarele de câmp înfășurat, cât și în motoarele PM, dar în motoarele de câmp, bobina de câmp ar trebui să rămână energizată de o sursă de curent continuu pentru ca acțiunea generatorului să funcționeze. Desigur, este posibil să proiectați un sistem pentru a *utiliza* puterea de frânare în loc să o aruncați. Acest lucru se face în modele de mașini electrice, unde puterea dată de motorul de acționare la oprire este pusă înapoi în baterie; acest sistem este cunoscut sub numele de frânare *regenerativă*.

O altă modalitate de a frâna motorul este prin inversarea polarității armăturii și, prin urmare, determinând motorul să aplice un cuplu de mers în marșarier la sarcină. Acest tip de frânare se numește **conectare**. Problema este că atunci când tensiunea este inversată, devine aceeași polaritate ca și CEMF, astfel încât acestea să adauge. Acest lucru înseamnă că, dacă inversați brusc tensiunea pe un motor de 12 V, efectul este ca acela de a pune aproape 24 V peste armătură. Tensiunea bruscă mare va provoca un salt mare de curent, care ar putea deteriora armatura. Pentru a preveni această problemă, un rezistor de serie este pus în circuitul de tensiune de mers în marșarier [a se vedea figura 7.35(b)]. De asemenea, atunci când motorul se oprește în cele din urmă, tensiunea de mers înapoi trebuie oprită, astfel încât motorul să nu înceapă să ruleze înapoi. Această comutare ar putea fi realizată cu un comutator centrifugal similar cu cel prezentat în figura 9.16.

7.5 O APLICAȚIE CUPRINZĂTOARE

UTILIZAREA UNUI MIC MOTOR DE CURENT CONTINUU

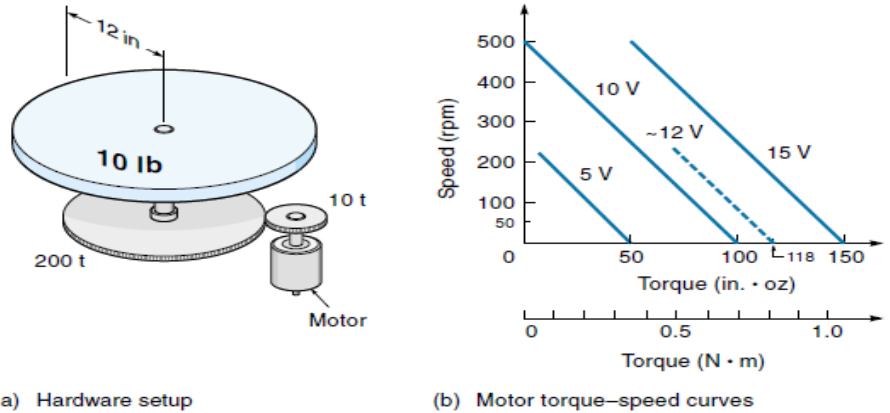
Exemplul 7.7 ilustrează o problemă practică de aplicare a motorului. Procesul necesită să înțelegeți caracteristicile întregului sistem. Acest exemplu vă va oferi o idee despre factorii din viața reală implicați în selecția motorie. (Acest exemplu integrează unele materiale din capitolul 5.)

EXEMPLUL 7.7

Un motor PM transportă o placă turnantă mare de 24 in., 10 lb printr-un tren cu angrenaj de 20: 1 [Figura 7.36 (a)]. O cerință specială este ca platanul să poată accelera de la o poziție de repaus la 90° în 0,2 s. Determinați tensiunea necesară a motorului. Curbele de turație a cuplului ale motorului sunt prezentate în figura 7.36 litera (b).

Figura 7.36

Conducerea
unui motor
platan
(exemplul
7.7).

**SOLUȚIE**

Pentru a rezolva această problemă din viața reală, trebuie să știm cum să calculăm forțele necesare pentru a pune piesele în mișcare și pentru a înțelege caracteristicile de turație a cuplului ale motoarelor de curent continuu. Accelerarea de la 0 la 90° în 0,2 s este o solicitare de timp de răspuns și este determinată de momentul de inerție al sistemului (I). Deoarece platanul este masiv în comparație cu motorul, vom lua în considerare doar momentul de inerție al platanului în problemă. În primul rând, se calculează platanului I . Pentru un disc,

$$I = \frac{1}{2}mr^2 \quad (7.16)$$

unde

I = moment de inerție

m = masă (în acest caz, $m = g/g = 10 \text{ lb}/32 \text{ ft/s}^2$)

r = rază (în acest caz, 12 in., sau 1 ft)

După conectarea numerelor, obținem

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{2} \frac{10 \text{ lb s}^2}{32 \text{ ft}} \text{ 1 ft}^2 \\ &= 0.156 \text{ lb} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{ft} \end{aligned}$$

$$I = 0.156 \text{ lb} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{ft} \times \frac{16 \text{ oz}}{\text{lb}} \times \frac{12 \text{ in.}}{\text{ft}} = 30 \text{ in.} \cdot \text{oz} \cdot \text{s}^2$$

care este momentul de inerție pentru platan.

În al doilea rând, trebuie să știm accelerația necesară. Din capitolul 5, amintiți-vă ecuația care se referă la poziția la accelerație:

$$\theta = \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad (7.17)$$

unde

θ = unghiul în radiani

α = accelerație unghiulară

t = timpul scurs de când obiectul era în repaus

Rezolvarea pentru accelerație, constatăm că

$$\alpha = \frac{2\theta}{t^2} = \frac{2(90^\circ)}{(0.2 \text{ s})^2} \times \frac{\pi \text{ rad}}{180^\circ} = 79 \text{ rad/s}^2$$

Acum trebuie să determinăm cuplul motor necesar pentru a provoca această accelerație. Ecuația de bază a mișcării unghiulare este

$$T = I\alpha \quad (7.18)$$

unde T este cuplul motorului. Dar amintiți-vă că motorul este conectat la platan printr-un raport de transmisie 20: 1. Astfel, momentul platan de inerție reflectat înapoi la motor este de numai 1/20 pătrat la fel de mare, iar motorul trebuie să accelereze de 20 de ori mai repede decât platanul, așa cum se arată în următoarea ecuație:

$$T = I\alpha = \underbrace{\frac{(30 \text{ in.} \cdot \text{oz} \cdot \text{s}^2)}{20^2}}_{\substack{I \text{ of table} \\ \text{(as reflected} \\ \text{to motor)}}} \times \underbrace{\frac{(79 \times 20)}{\text{s}^2}}_{\substack{\alpha \text{ required} \\ \text{of motor}}} = 118 \text{ in.} \cdot \text{oz}$$

Acest rezultat arată că 118 inch · oz de cuplu motor sunt necesare pentru a accelera platan. Privind de-a lungul axei xa curbelor cuplu-turație [Figura 7.36 (b)] vedem că pentru un cuplu stand de 118 in. · oz, motorul trebuie să obțină aproximativ 12 V. Răspunsul la întrebarea inițială pare să fie la fel de fol-lows: Tensiunea motorului pentru a roti platanul 90° în 0,2 s este egală cu 12 V.

Comentariu final

Există o problemă, cu toate acestea, cu această concluzie, deoarece se bazează pe presupunerea că cuplul este o *constantă* 118 inch · oz. Este adevărat că atunci când motorul este la o oprire, 12 V va provoca un cuplu de 118 inch · oz, dar până în momentul în care platanul sa mutat 90 °, motorul ajunge la 50 rps și cuplul este de până la 110 inch · Oz. În acest caz, diferența dintre 118 și 110 in. · oz nu este atât de mult și poate (cu ajustări minore) să fie considerat o soluție acceptabilă. Obținerea răspunsului precis la această problemă ar necesita fie matematică dincolo de domeniul de aplicare al acestui text, fie testare empirică.

EXEMPLUL 7.7 (Repetat cu unități SI)

Un motor PM transformă o placă turnantă mare cu diametrul de 60 cm, de 4,5 kg, printr-un tren cu angrenaj de 20:1 [Figura 7.36 litera (a)]. O cerință specială este ca platanul să poată accelera de la o poziție de repaus la 90° în 0,2 s. Determinați tensiunea necesară motorului. Curbele de turație a cuplului ale motorului sunt prezentate în figura 7.36 litera (b).

SOLUȚIE

Accelerarea de la 0 la 90° în 0,2 s este o cerință de timp de răspuns și este descurajată de momentul de inerție al sistemului (I). Deoarece platanul este masiv în comparație cu motorul, vom lua în considerare doar momentul de inerție al platanului în problemă. În primul rând, se calculează platanului I . Pentru un disc,

$$I = \frac{1}{2}mr^2 \quad (7.16)$$

unde

I = moment de inerție

m = masa (în acest caz, 4,5 kg)

r = raza (în acest caz, 30 cm)

După conectarea numerelor, obținem

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{2} 4.5 \text{ kg } 30 \text{ cm}^2 \\ &= 2025 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 = 0.2025 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

care este momentul de inerție pentru platan.

În al doilea rând, trebuie să știm accelerația necesară:

$$\theta = \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad (7.17)$$

Unde

θ = unghiul în radiani

α = accelerație unghiulară

t = timpul scurs de când obiectul era în repaus

Rezolvarea pentru accelerație, constatăm că

$$\alpha = \frac{2\theta}{t^2} = \frac{2(90^\circ)}{(0.2s)^2} \times \frac{\pi \text{ rad}}{180^\circ} = 79 \text{ rad/s}^2$$

Acum trebuie să determinăm cuplul motor necesar pentru a provoca această accelerație. Ecuația de bază a mișcării unghiulare este

$$T = I\alpha \quad (7.18)$$

unde T este cuplul motorului. Dar amintiți-vă că motorul este conectat la platan printr-un raport de transmisie 20: 1. Astfel, momentul platanului reflectat înapoi la motor este de numai 1/20 pătrat la fel de mare, iar motorul trebuie să accelereze de 20 de ori mai repede decât platanul, așa cum se arată în următoarea ecuație:

$$T = I\alpha = \underbrace{\frac{(0.2025 \text{ kg} \cdot \text{m}^2)}{20^2}}_{\substack{I \text{ of table} \\ \text{(as reflected} \\ \text{to motor)}}} \times \underbrace{\frac{(79 \times 20)}{s^2}}_{\substack{\alpha \text{ required} \\ \text{of motor}}} = 0.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

[Notă: Relația $1 \text{ kg} = 1 \text{ N} / (1 \text{ m} / \text{s}^2)$ a fost folosit pentru a obține unități pentru a anula.]

Acest rezultat arată că $0.8 \text{ N} \cdot \text{m}$ de cuplu motor este necesar pentru a accelera platanul. Privind de-a lungul axei x a curbelor de turație a cuplului [Figura 7.36 (b)] vedem că pentru un cuplu de stand de $0.8 \text{ N} \cdot \text{m}$, motorul trebuie să obțină aproximativ 12 V. Răspunsul la întrebarea inițială pare să fie următorul: Tensiunea motorului pentru a roti platanul la 90° în $0,2 \text{ s}$ este egală cu 12 V. (Cu toate acestea, a se vedea "Comentariul final" de la pagina 333.)

7.6 MOTOARE DE CURENT CONTINUU FĂRĂ PERII

Punctul slab în proiectarea mecanică a motorului de curent continuu sunt periile care se freacă de comutatorul (colectorul) rotativ (pentru a obține curent în armătură). Periile se uzează, se murdăresc, provoacă praf și sunt zgomotoase din punct de vedere electric.

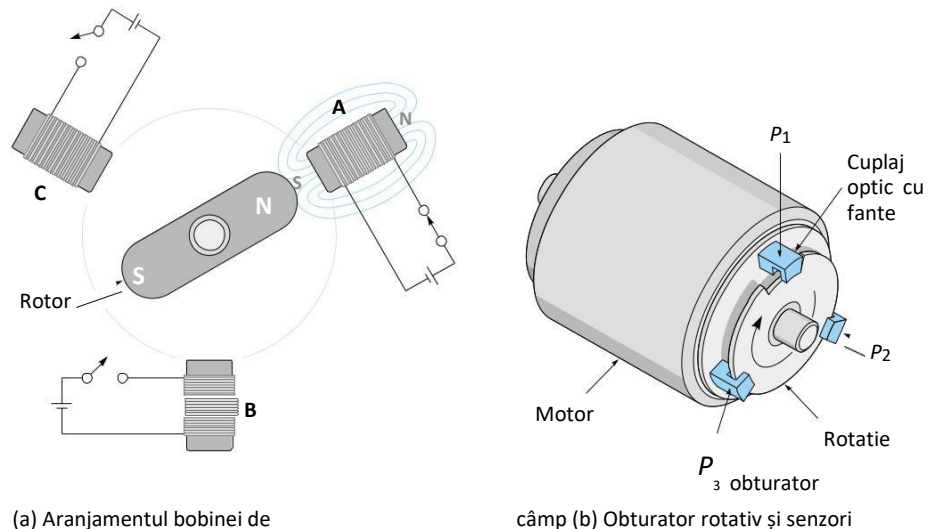
Motorul DC fără perii (BLDC) funcționează fără perii, profitând de tehnicile moderne de comutare electronică. Deși acest lucru adaugă o anumită complexitate, rezultatul este un motor care este extrem de fiabil, foarte eficient și ușor de controlat - toate calitățile foarte dorite. BLDC devine din ce în ce mai popular, în special în acele cazuri în care motorul trebuie să fie operat de la o sursă de curent continuu, cum ar fi o baterie.

Figura 7.37 litera (a) prezintă o diagramă a unui BLDC trifazat. Armătura (numită **rotor**) este un magnet permanent și este înconjurată de trei bobine de câmp. Fiecare bobină de câmp poate fi pornită și oprită independent. Când o bobină este pornită, cum ar fi bobina A din figura 7.37 (a), polul nord al magnetului rotorului este atras de acea bobină. Prin pornirea și oprirea bobinelor în ordine (A, B, C), rotorul este "rotit" în sensul acelor de ceasornic - adică câmpul s-a rotit electronic.

BLDCs au multe în comun cu motoare pas cu pas, care sunt discutate în detaliu în capitolul 8. Diferența majoră dintre aceste două tipuri de motoare este că BLDC este folosit ca sursă de putere rotativă, ca un motor electric obișnuit, în timp ce motorul pas cu pas este utilizat atunci când este necesar să se iasă în poziții precise și apoi să se oprească. Spre deosebire de motorul pas cu pas, BLDC are un sistem de senzori încorporat pentru a direcționa trecerea de la o bobină de câmp la alta. Figura 7.37 (b) prezintă BLDC trifazat cu trei cuplaje optice cu fante și un obturator rotativ (senzorii cu efect Hall pot fi utilizați și pentru această aplicație). Acești senzori de poziție controlează înfășurările de câmp. Când obturatorul este deschis pentru senzorul P_1 așa cum se arată, bobina de câmp A [Figura 7.37(a)] este energizată. În cazul în care rotorul de fapt

Figura 7.37

Motor de curent continuu.
fără perii trifazat.



ajunge la bobina de câmp A, senzorul P_1 este oprit și P_2 este pornit, energizând bobina de câmp B și rotind rotorul în jurul bobinei B și așa mai departe. În acest mod, rotorul este făcut să se rotească fără conexiune electrică între rotor și carcasa câmpului.

Figura 7.38 prezintă o schemă a unui BLDC trifazat generalizat. Cei trei senzori de poziție se conectează la circuitele de control. În cel mai simplu caz, cum ar fi descris în paragraful precedent, aceste semnale sunt transmise direct comutatoarelor solid-state care conduc bobinele motorului. Un sistem mai sofisticat de control al motorului ar asigura motorului inversarea direcției (prin inversarea secvențierii) și ar controla viteza prin utilizarea tehnicilor PWM.

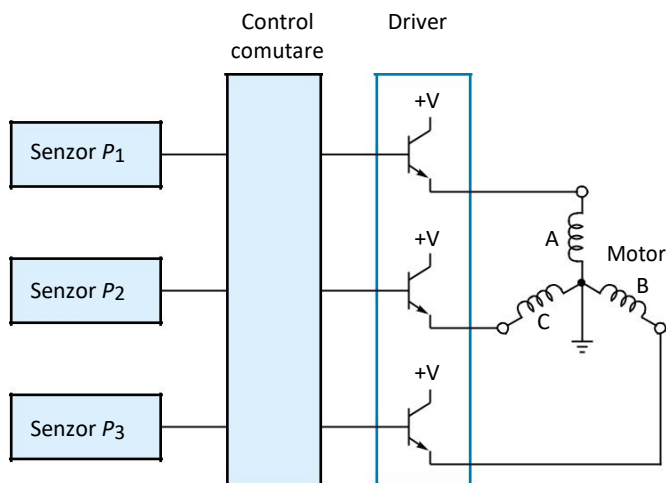
De la introducerea sa în 1962, motorul BLDC a suferit o îmbunătățire continuă. În special, disponibilitatea materialelor cu magneti îmbunătățiți, a semiconductoarelor mai bune pentru controlul puterii și a circuitelor integrate specifice aplicațiilor (ASIC) au contribuit la creșterea BLDC la niveluri mai ridicate de performanță. Modelele mai mari sunt alimentate din curent alternativ redresat folosind circuite similare cu cele prezentate în Figura 7.33. DC este apoi pornit rapid și oprit cu MOSFET-uri de putere sau tranzistoare bipolare pentru a crea o unitate PWM la bobinele motorului.

Motoarele BLDC prezintă un control excelent al vitezei. De fapt, unele modele vin cu un tahometru încorporat care se alimentează înapoi la unitatea de control, permițând o reglare a vitezei de 0% (perfectă). Atunci când sunt utilizate într-un sistem de control al mișcării cu turație variabilă, BLDCs își pot varia viteza în intervalul de 100:1. Cu toate acestea, spre deosebire de un motor de curent continuu cu perii, BLDC are o viteză minimă de funcționare (în jur de 300 rpm).

Pe lângă faptul că sunt mai fiabile, motoarele BLDC moderne au avantaje de performanță față de motoarele de curent continuu periat și chiar motoarele cu inducție în curent alternativ (motoarele de curent alternativ sunt acoperite în capitolul 9). Mai exact, motoarele BLDC au o eficiență energetică mai mare (folosesc mai puțină

Figura 7.38

Schema unui BLDC trifazat.



putere pentru aceiași cai putere) și sunt mai mici și mai ușoare decât alte tipuri de motoare cu aceiași cai putere. Pare rezonabil să se concluzioneze că motorul BLDC va continua să se îmbunătățească și să fie adoptat în tot mai multe aplicații.

REZUMAT

Motorul electric, cel mai comun tip de acționare, se bazează pe principiul că un conductor purtător de curent va genera o forță fizică atunci când se află în prezența unui câmp magnetic. Motorul de curent continuu constă dintr-o armătură rotativă și un câmp magnetic staționar. Curentul din armătură, care trebuie să vină prin perii, și provoacă forțele de rotație. Câmpul magnetic staționar este asigurat fie de electromagneți (caz în care se numește motor de câmp înfășurat), fie de magneți permanenți.

Există trei tipuri de motoare de câmp înfășurat. Motorul serie are armătura și înfășurările de câmp conectate în serie. Acest tip de motor se caracterizează printr-un cuplu mare de pornire și o viteză mare fără sarcină, dar o reglare slabă a vitezei (viteza se schimbă considerabil dacă sarcina se schimbă). Motorul derivație are armătura și înfășurările de câmp conectate în paralel. Acest tip de motor are o reglare a vitezei mult mai bună decât motorul de serie. Motorul compus are atât înfășurări de câmp serie, cât și de tip derivație și combină caracteristicile bune atât ale motoarelor serie, cât și ale motoarelor derivație.

Motoarele cu magnet permanent (PM) utilizează magneți permanenți pentru a furniza câmpul magnetic staționar. Acest lucru duce la o curbă foarte liniară cuplu-turație, ceea ce face ușor de calculat viteza motorului pentru diferite condiții de sarcină și, astfel, atractiv pentru aplicațiile sistemelor de control.

Există două modalități de a controla viteza unui motor de curent continuu: (1) Unitatea analogică utilizează amplificatoare liniare pentru a oferi o tensiune DC variabilă motorului. Deși simplă și directă, această metodă este foarte inefficientă în putere și este de obicei utilizată numai cu motoare mai mici. (2) Modulația puls-lățime (PWM), o metodă mai eficientă, oferă motorului impulsuri de tensiune constante de diferite lățimi: cu cât pulsul este mai larg, cu atât mai multă energie este transferată motorului. Pentru motoarele de curent continuu mai mari, SCRs alimentează motorul cu impulsuri luate direct din forma de undă AC. Aceasta este o formă de PWM și elimină necesitatea unei surse mari de curent continuu.

Cel mai nou tip de motor de curent continuu este motorul dc fără perii (BLDC). Acest motor folosește magneti permanenți în loc de bobine în armătura (numit rotor) și deci nu are nevoie de perii. Bobinele de câmp sunt pornite și oprite într-o secvență rotativă care mișcă rotorul în jurul valorii nominale. BLDCs au senzori atunci când bobinele de câmp individuale urmează să fie pornite și oprite.

GLOSAR

acționare analogică O metodă de control al vitezei unui motor electric prin variația tensiunii de alimentare cu curent continuu.

armătură Partea unui motor care răspunde la câmpul magnetic; de obicei, armătura este ansamblul rotativ al unui motor electric.

BLDC A se vedea motorul dc fără perii.

perie O tijă conductoare staționară care se freacă pe comutatorul rotativ și conduce curentul în înfășurările armăturii.

motor dc fără perii (BLDC) Cel mai nou tip de motor de curent continuu care nu utilizează un comutator sau perii; în schimb, înfășurările câmpului sunt pornite și oprite în ordine, iar rotorul magnetului permanent (armătura) este tras în jurul de câmpul magnetic rotativ.

CEMF A se vedea **contra-FME**.

comutator Partea unei armături care intră în contact cu perii.

motor compus Un motor care are atât înfășurări de câmp derivație, cât și serie.

Contra-EMF (CEMF) O tensiune care este generată în interiorul unui motor electric la rularea sub propria sa putere; polaritatea MIE este întotdeauna opusă tensiunii aplicate.

motor compus cumulativ Un motor compus în care câmpurile magnetice ale câmpurilor derivație și serie se ajută reciproc.

motor compus diferențial Un motor compus în care câmpurile magnetice ale derivației și înfășurările serie se opun reciproc.

ciclu de funcționare Procentul de timp de ciclu pe care pulsul PWM este ridicat, adică o undă pătrată are un ciclu de funcționare de 50%.

frânare dinamică O metodă de frânare a motorului prin comutarea armăturii la un rezistor. Motorul generează curent care este disipat în rezistor, eliminând astfel energia din sistem.

câmp Partea unui motor electric care oferă un câmp magnetic; de obicei, este partea staționară.

înfășurarea câmpului Un electromagnet staționar utilizat pentru a asigura câmpul magnetic necesar armăturii.

Capul de transmisie În motoarele mai mici, un tren de viteze atașat sau încorporat la ansamblul motorului, ceea ce oferă efectiv motorului mai mult cuplu la mai puțin rpm.

menținerea curentului Odată ce SCR a fost pornit, curentul mic (la SCR) necesar pentru a menține SCR în starea de conducere.

Văd moment de inerție.

cuplu de sarcină Cuplul necesar motorului pentru a roti sarcina.

moment de inerție (J) O cantitate bazată pe masa și forma unei părți rotative; cu cât sunt mai mari, cu atât este nevoie de mai mult cuplu pentru a schimba turația piesei.

viteza fără sarcină Viteza unui motor atunci când nu există nici o sarcină externă pe el; acesta va fi întotdeauna viteza maximă (pentru o anumită tensiune).

motoare cu magnet permanent (PM) Un motor care utilizează magneți permanenți pentru a furniza câmpul magnetic. Motorul PM are o relație liniară cuplu-turație, ceea ce îl face de dorit pentru aplicațiile de control.

conectarea unei metode de frânare a motorului prin inversarea polarității înfășurărilor armăturii, determinând motorul să aplice un cuplu de mers în marșarier la sarcină.

Motor PM *Vezi* **motor cu magnet permanent.**

modulația puls-lățime (PWM) O metodă de control al vitezei unui motor electric prin furnizarea de impulsuri care sunt la o tensiune dc constantă. Lățimea impulsurilor este variată pentru a controla viteza.

PWM *A se vedea* **modulația puls-lățime.**

viteza nominală Viteza unui motor atunci când produce caii putere nominali.

circuit redus de pornire a tensiunii Un circuit special care limitează pornirea curentului motorului.

rotor Partea rotativă a unui motor; dacă polii de câmp sunt staționari (așa cum sunt de obicei), atunci rotorul este cunoscut sub numele de armătură.

SCR *Vezi* **redresor cu siliciu controlat.**

motor de serie un motor care are înfășurările de câmp conectate în serie cu armătura; motorul de serie are un cuplu de pornire ridicat și o viteză mare fără sarcină.

motor cu rană de șunt Un motor care are înfășurările de câmp conectate în paralel cu înfășurările armăturii; motorul derivație are o măsură de reglare naturală a vitezei, adică tinde să mențină o anumită viteză în ciuda schimbărilor de sarcină.

redresor cu siliciu controlat (SCR) Un dispozitiv semiconductor care furnizează control de viteză unui motor de curent continuu de la o sursă de curent alternativ (fără a fi nevoie de o sursă de alimentare).

reglarea vitezei În general, capacitatea unui motor de a-și menține viteza sub sarcini diferite; în special, un procent bazat pe viteza fără sarcină și viteza de încărcare completă.

cuplu stand Cuplul motorului atunci când arborele este împiedicat să se rotească; acesta va fi întotdeauna cuplul maxim (pentru o anumită tensiune).

cuplu În general, măsurarea rezistenței motorului în furnizarea unei forțe de răsucire; mai exact, produsul unei forțe tangențiale ori raza. **340 CAPITOLUL 7**

curba cuplu-turație Un grafic al cuplului unui motor versus turație; poate fi utilizat pentru a pre-dicta viteza motorului în diferite condiții de sarcină.

comutator de tensiune zero O tehnică de pornire a unui dispozitiv de curent alternativ (cum ar fi un SCR) numai la începutul ciclului, când tensiunea este oricum zero. Acest sistem elimină creșterea bruscă a tensiunii la pornire și reduce generarea de interferențe de înaltă frecvență.

EXERCIȚII

Secțiunea 7.1

1. Ce este MIE? Cum și de ce afectează performanța motorului electric?
2. Un motor de curent continuu funcționează cu o tensiune de linie de 90 V, un CEMF de 80 V și o rezistență a armăturii de 3 Ω . Găsiți curentul armăturii.
3. Un motor generează un CEMF la o viteză de 0,4 V/100 rpm și are o rezistență la armătură de 20 Ω . Zece volți sunt aplicate la (oprit) motor. Găsiți curentul armaturii imediat după ce puterea este aplicată și atunci când viteza este de 1500 rpm.
4. Un motor generează un CEMF la o viteză de 0,5 V/100 rpm și are o rezistență la armătură de 15 Ω . Doisprezece volți sunt aplicate la (oprit) motor. Găsiți curentul armăturii imediat după aplicarea puterii și când viteza este de 1500 rpm.

Secțiunea 7.2

5. Care sunt caracteristicile distinctive ale motorului de curent continuu cu rană de serie?
6. Explicați *cuplul standului* și *viteza fără sarcină*.
7. Care sunt caracteristicile distinctive ale motorului cu înfășurare derivație?
8. Când 24 V sunt aplicate unui motor fără sarcină, viteza se oprește la 2300 rpm. Când sarcina este conectată, viteza scade la 2050 rpm. Calculați reglarea vitezei acestui motor.
9. Când 90 V sunt aplicate pe un motor fără sarcină, viteza se oprește la 2000 rpm. Când sarcina este conectată, viteza scade la 1750 rpm. Calculați reglarea vitezei acestui motor.
10. Selectați un motor din lista figurii 7.4 care îndeplinește următoarele cerințe: Cuplu de încărcare = 3 ft · lb, și viteza = 1750 rpm.

Secțiunea 7.3

11. De ce este motorul PM deosebit de potrivit pentru a controla aplicațiile sistemului?
12. Un motor PM furnizat cu 10 V are curbele de turație a cuplului din figura 7.10.
 - a. Găsiți cuplul standului.
 - b. Găsiți viteza fără încărcare.
 - c. Găsiți viteza în rpm a motorului în cazul în care acesta este folosit la ridicarea unei sarcini de 4 oz peste un scripete rază de 3-in.
 - d. Se introduce o trecere a angrenajului de 3: 1 trepte între motor și arborele scripetilor (din partea c). Schițați configurarea și determinați turația motorului.

13. Un motor PM are curbele cuplu-turație din Figura 7.10. Doriți să utilizați motorul într-o aplicație care necesită o viteză de 450 rpm și o sarcină de 11 inch · Oz. Ce tensiune trebuie furnizată motorului?
14. Un motor are curbele de turație a cuplului din figura 7.10. Dacă tensiunea de alimentare este de 12 V, care este cel mai mare cuplu pe care îl poate oferi motorul și menține în continuare o viteză de 600 rpm?
15. Pentru motorul din figura 7.11 litera (a), desenați curba cuplu-turație pentru modelul 22-45-16.
16. Pentru modelul 22-45-12 din Figura 7.11(a), găsiți cuplul motor aproximativ dacă tensiunea aplicată este de 15 V și viteza este de 5000 rpm.

Secțiunea 7.4

17. Comentați eficiența energetică a unui sistem de control al motorului cu acționare analogică care utilizează un amplificator de putere de clasă A.
18. Un circuit cu acționare analogică utilizează un tranzistor Darlington de putere. Tensiunea de alimentare este de 10 V; la 300 rpm, motorul desenează 500 mA cu o tensiune de 3 V. Câtă putere se disipează tranzistorul?
19. Un circuit cu acționare analogică utilizează un tranzistor Darlington de putere. Tensiunea de alimentare este de 12 V; la 400 rpm, motorul consumă 1 A cu o tensiune de 7 V. Câtă putere se disipează tranzistorul?
20. Explicați principiul PWM pentru controlul vitezei motorului.
21. Ce ciclu de funcționare ați specifica pentru a face un motor de 2000 rpm, 12 V să funcționeze la 1500 rpm? (Să presupunem impulsuri 12-V și pierderi mici PWM.)
22. Ce ciclu de funcționare ați specifica pentru a face un motor de 1500 rpm, 12 V să funcționeze la 1000 rpm? (Să presupunem impulsuri 12-V și pierderi mici PWM.)
23. Care sunt avantajele PWM față de unitatea analogică pentru controlul motorului?
24. Explicați modul în care este activată și dezactivată o SCR.
25. Schițați forma de undă de tensiune a unui motor SCR cu undă completă pentru următoarele condiții:
 - a. SCR începe să efectueze la 30°.
 - b. SCR începe să efectueze la 120°.

Secțiunea 7.5

26. O antenă rotativă are un moment de inerție (I) de $0,8 \text{ lb} \cdot \text{ft} \cdot \text{s}^2$. Este condus printr-o cutie de viteze 10: 1 de către un motor de curent continuu (motorul se transformă de 10 ori mai rapid). Antena trebuie să se rotească la 180° de repaus în 1 s. Caracteristicile motorului sunt în figura 7.36. Găsiți tensiunea motorului necesară.
27. O antenă rotativă are un moment de inerție (I) de $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Este condus printr-o cutie de viteze 10: 1 de către un motor de curent continuu. Antena trebuie să se rotească la 180° de repaus în 1 s. Caracteristicile motorului sunt în figura 7.36. Găsiți tensiunea motorului necesară.

Secțiunea 7.6

28. Explicați cum funcționează un motor de curent continuu fără perii fără perii.

29. Care sunt avantajele unui BDCM față de un motor de curent continuu obișnuit?