

ELEKTRIČNO KOČENJE ASINHRONOG MOTORA

Razmatramo tri načina električnog kočenja:

1. Rekuperativno;
2. Protivstrujno na dva načina;
3. Dinamičko ili kočenje jednosmernom strujom.

1. Rekuperativno kočenje

Pokazano je da asinhroni motor radi kao asinhroni generator (razvija negativan momenat) kada je brzina obrtanja veća od sinhronne brzine ($\omega > \omega_s$), odnosno kada je klizanje negativno ($s < 0$).

U režimu asinhronog generatora mehanička energija koja se pretvara u električnu predaje (“vraća”) se izvoru napajanja, ako ovaj može da primi.

Rekuperativno kočenje

- U opisani režim kočenja može se doći na dva načina:
 - a) Ako se brzina motora poveća iznad sinhrona.* Tipičan primer su kolica sa asinhronim pogonom na nizbrdici.
 - b) Ako se sinhrona brzina smanji ispod trenutne brzine.* Primeri su smanjenje učestanosti napajanja, ili povećanje broja polova.

Rekuperativno kočenje

- Za realizaciju ovog kočenja nije potrebna dodatna oprema.

PRIMENA:

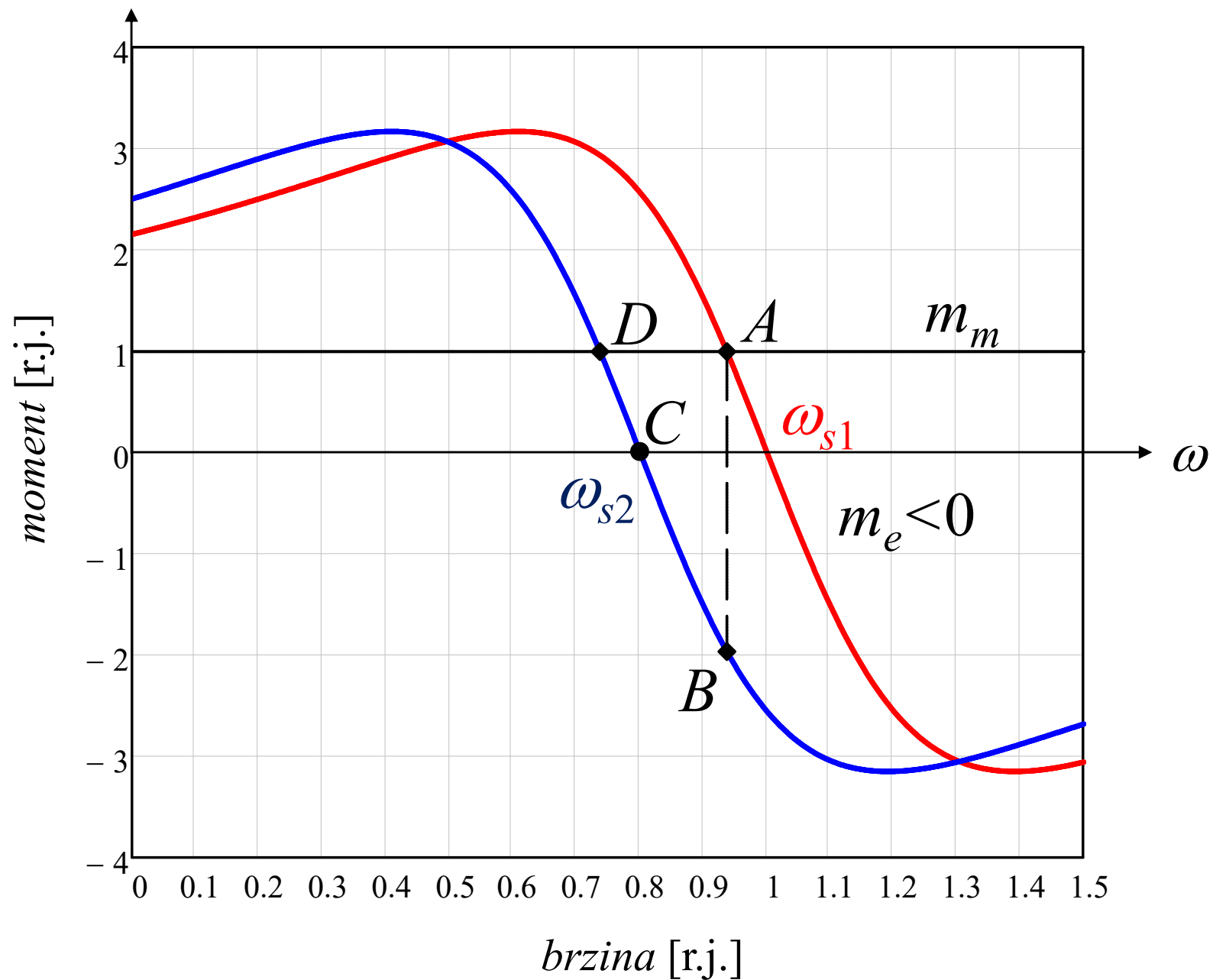
- Kočenje kod pogona sa potencijalnom prirodom opterećenja i u stacionarnom i u prelaznom režimu;
- Kočenje radi smanjenja brzine kod regulisanih pogona.

Rekuperativno kočenje

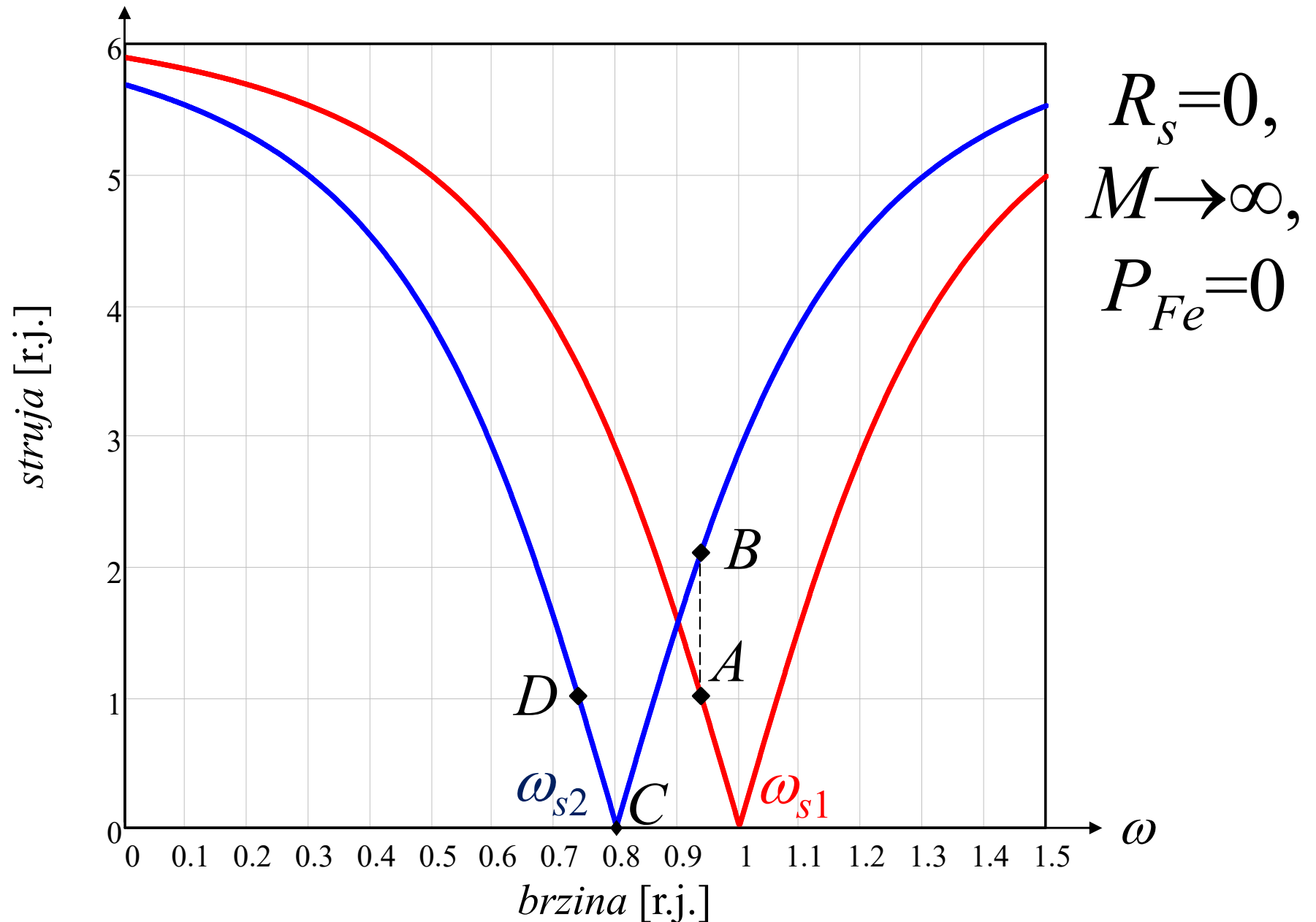
- Prikazane su dve statičke karakteristike momenta (mehaničke karakteristike), u I-kvadrantu (motornom) i u II-kvadrantu (generatorskom), pri sinhronim brzinama ω_{s1} i ω_{s2} .
- Kretanje radne tačke na statičkim karakteristikama kada se sinhrona brzina trenutno smanji sa ω_{s1} na ω_{s2} :

Iz stacionarnog stanja, tačka (A), radna tačka se premešta u (B) na novoj karakteristici, zatim preko tačke praznog hoda (C), do novog stacionarnog stanja sa manjom brzinom, tačka (D).
- Rekuperativno (generatorsko) kočenje se ima na delu karakteristike od tačke (B) do tačke praznog hoda (C), pri sinhronoj brzini ω_{s2} .

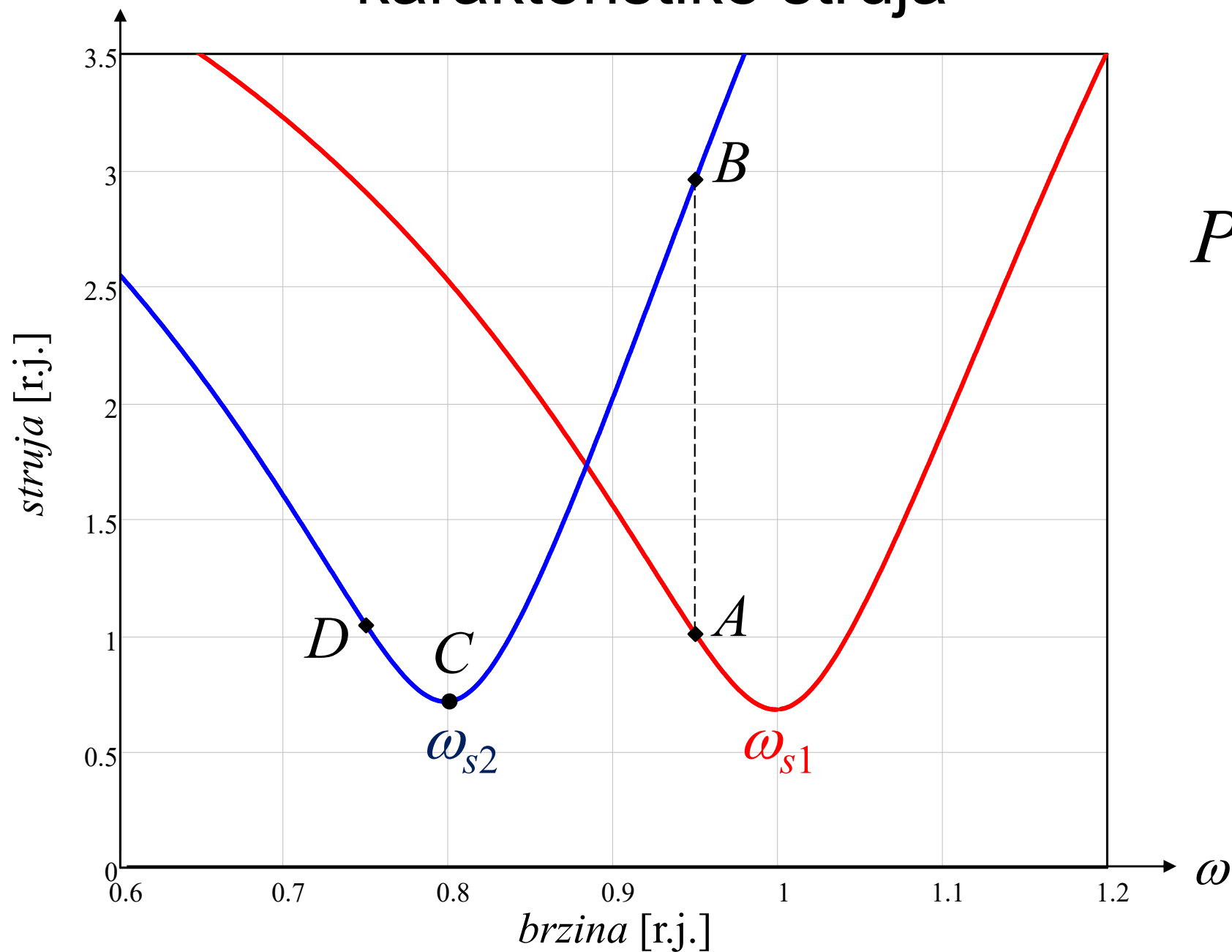
Rekuperativno kočenje – mehaničke karakteristike



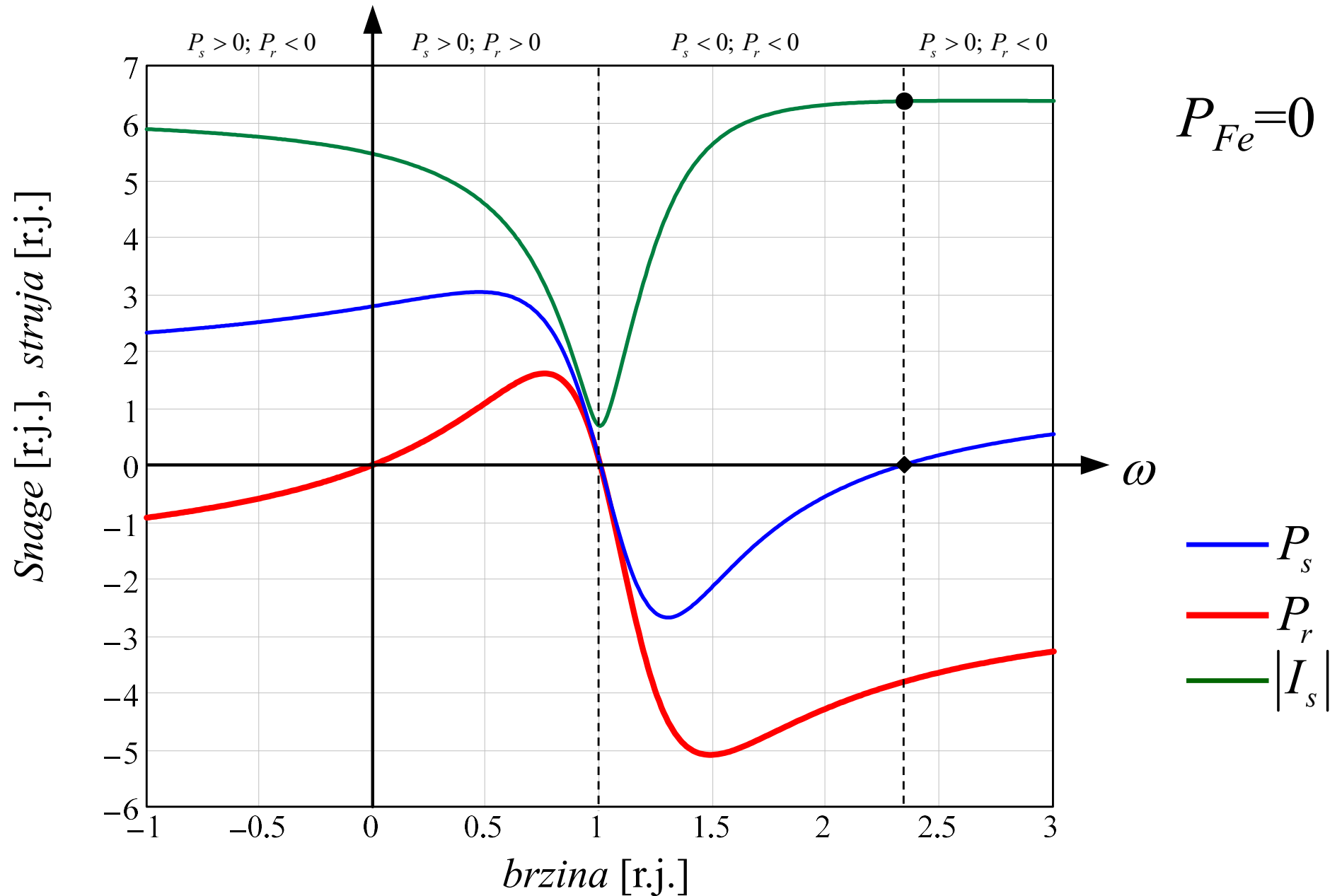
Rekuperativno kočenje – statičke karakteristike struja



Rekuperativno kočenje – statičke karakteristike struja



Statičke karakteristike snage uzete iz mreže (P_s),
 mehaničke snage (P_r) i efektivne vrednosti struje ($|I_s|$)
 motora sa kaveznim rotorom



2. PROTIVSTRUJNO KOČENJE

Prvi način

Ovo kočenje moguće je primeniti samo kod motora sa namotanim rotorom.

Ostvaruje se uključivanjem velikog dodatog otpora u kolo rotora.

Protivstrujno kočenje (I način) – mehaničke karakteristike

Kočenje otpočinje prelaskom iz stacionarnog stanja, tačka (A) u tačku (B).

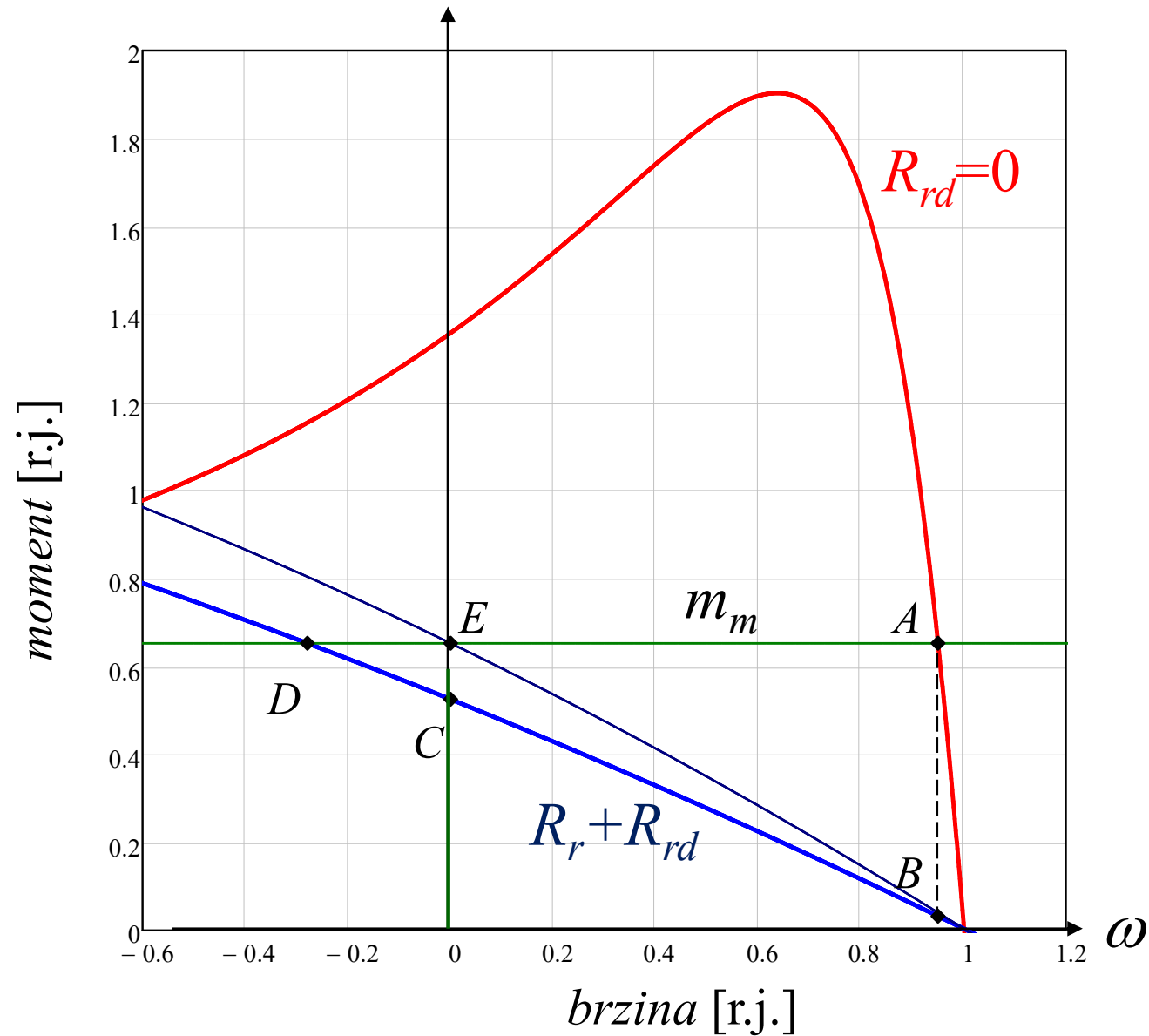
Pogon se može zaustaviti ako se dobije

$$M_e(\omega=0) < M_m$$

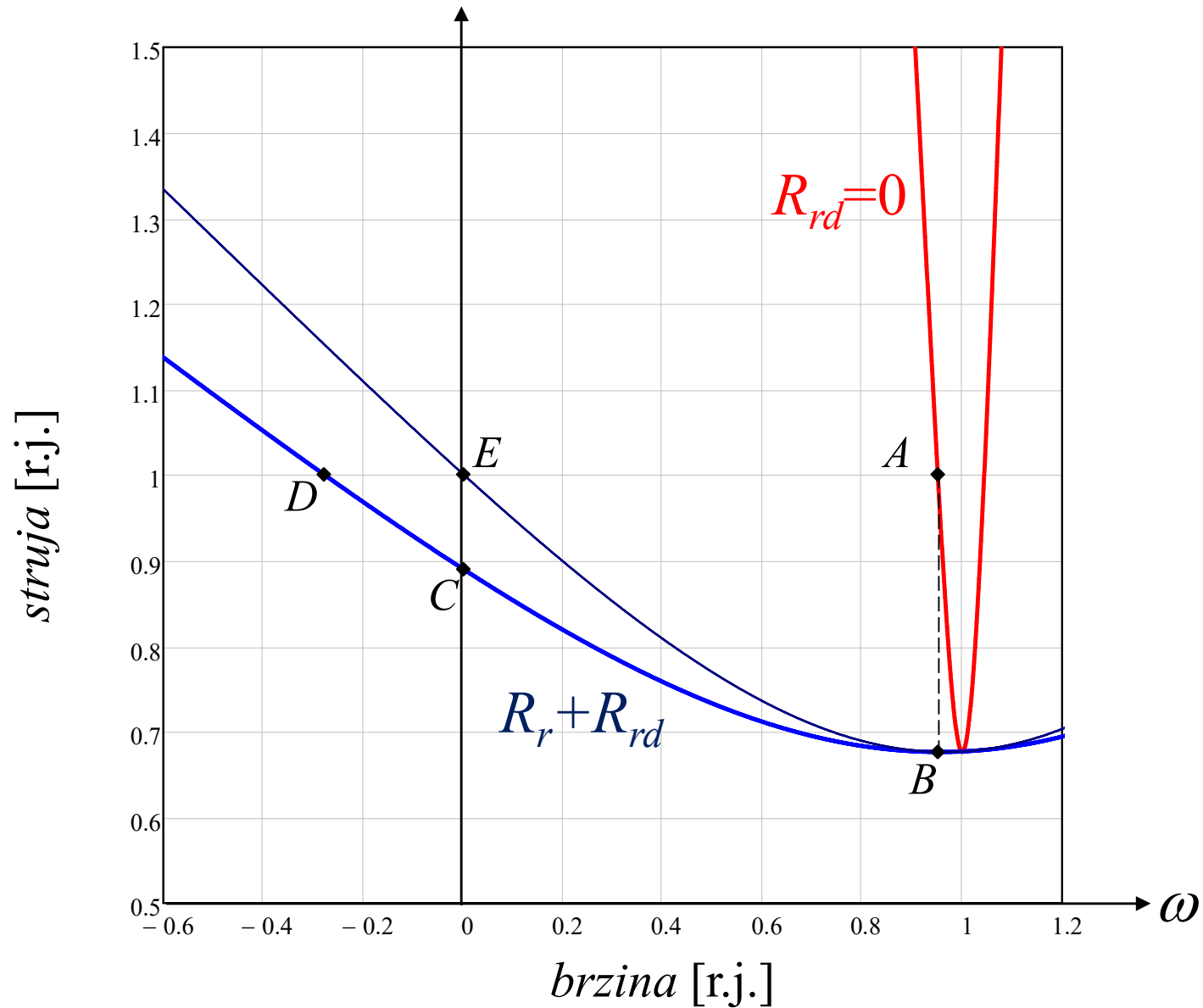
za slučaj reaktivne prirode opterećenja, tačka (C) na slici. Zaustavljanje se može ostvariti u slučaju da je otpor rotora prilagođen opterećenju pogona, tačka (E) na slici.

Pogon se može reversirati do novog stacionarnog stanja u slučaju potencijalne prirode opterećenja, tačka (D) na slici.

Protivstrujno kočenje (I način) – mehaničke karakteristike



Protivstrujno kočenje (I način) – statičke karakteristike struja



2. PROTIVSTRUJNO KOČENJE

Drugi način

- Ostvaruje se promenom smeru obrtanja obrtnog magnetnog polja, promenom redosleda faza na statoru.
- Ovaj način može se primenjivati i na motore sa kaveznim rotorom.
- Na slici je prikazan primer protivstrujnog kočenja promenom redosleda faza kod motora sa kratko spojenim rotorom koji pokreće potencijalno opterećenje.

Protivstrujno kočenje (II način) motora sa kaveznim rotorom – mehaničke karakteristike

Kočenje otpočinje ukrštanjem dve faze na statoru, usled čega se radna tačka premešta iz (A) u (B).

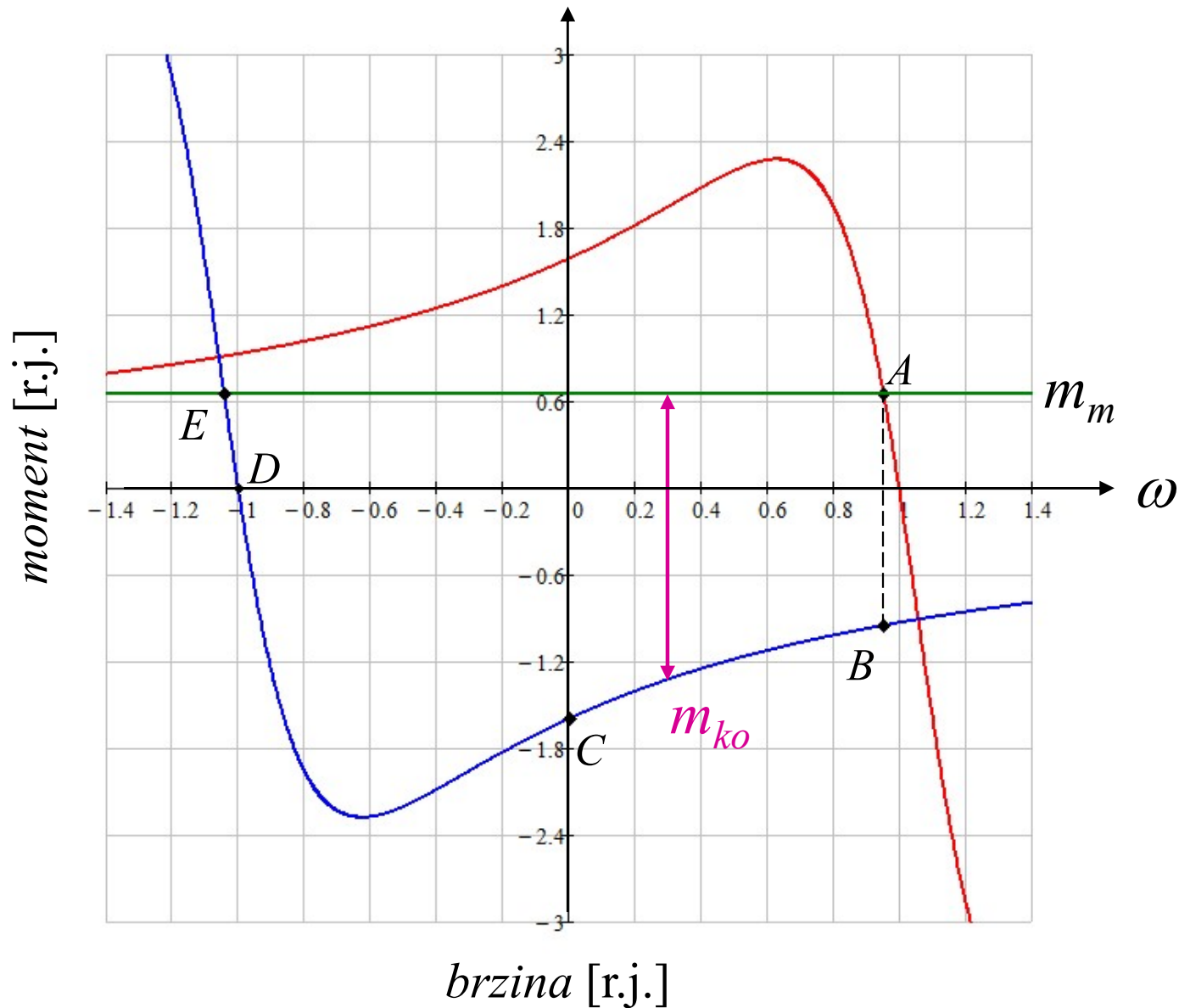
Od tačke (B) do (C) imamo protivstrujno kočenje.

Ubrzanje pogona sa suprotnim smerom obrtanja počinje od tačke (C) i traje do negativne sinhronne brzine, tačka (D).

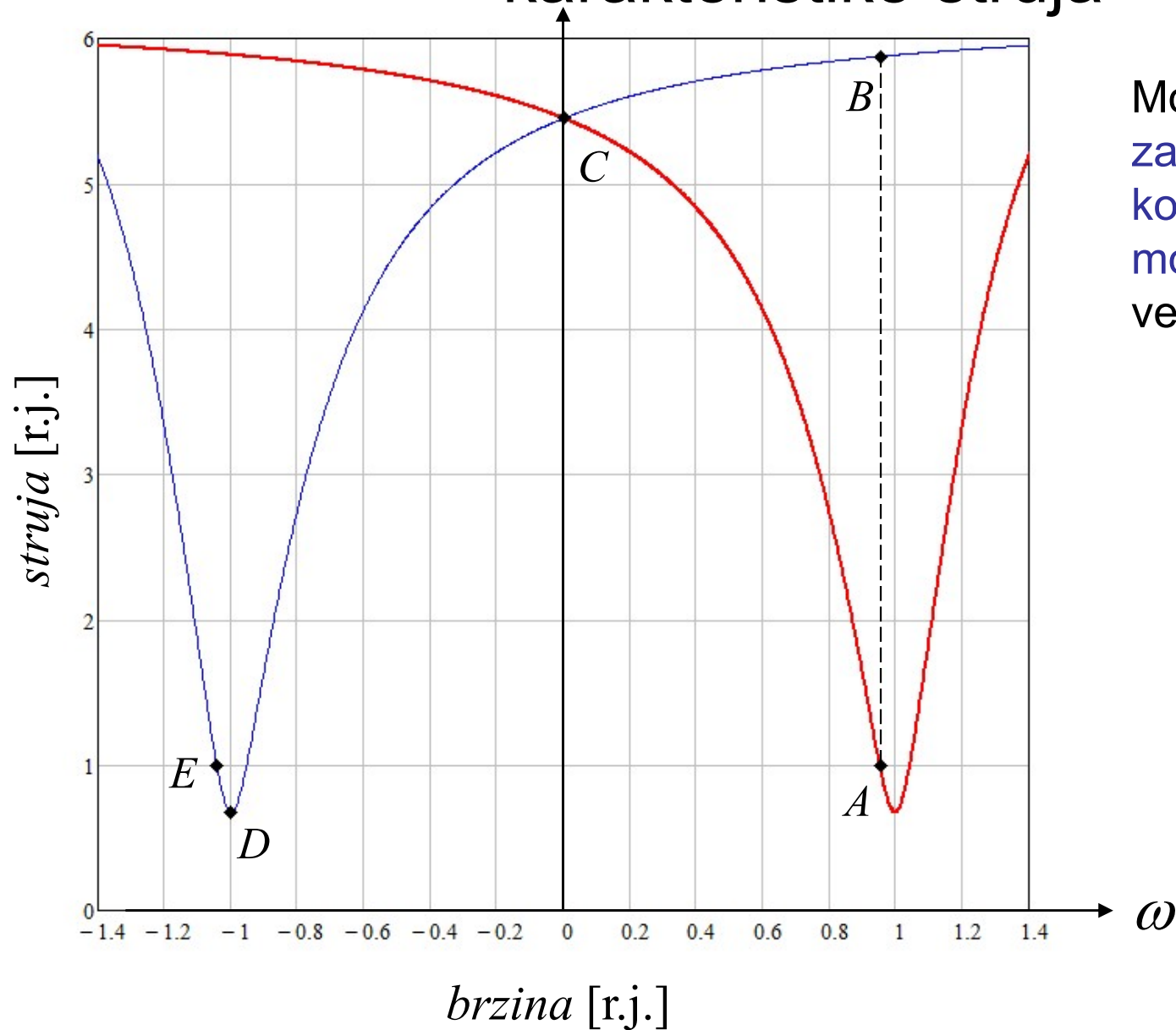
Od tačke (D) do (E) ima se rekuperativno kočenje.

U tački (E) nastupa novo stacionarno stanje u režimu rekuperativnog kočenja.

Protivstrujno kočenje (II način) motora sa kaveznim rotorom – mehaničke karakteristike



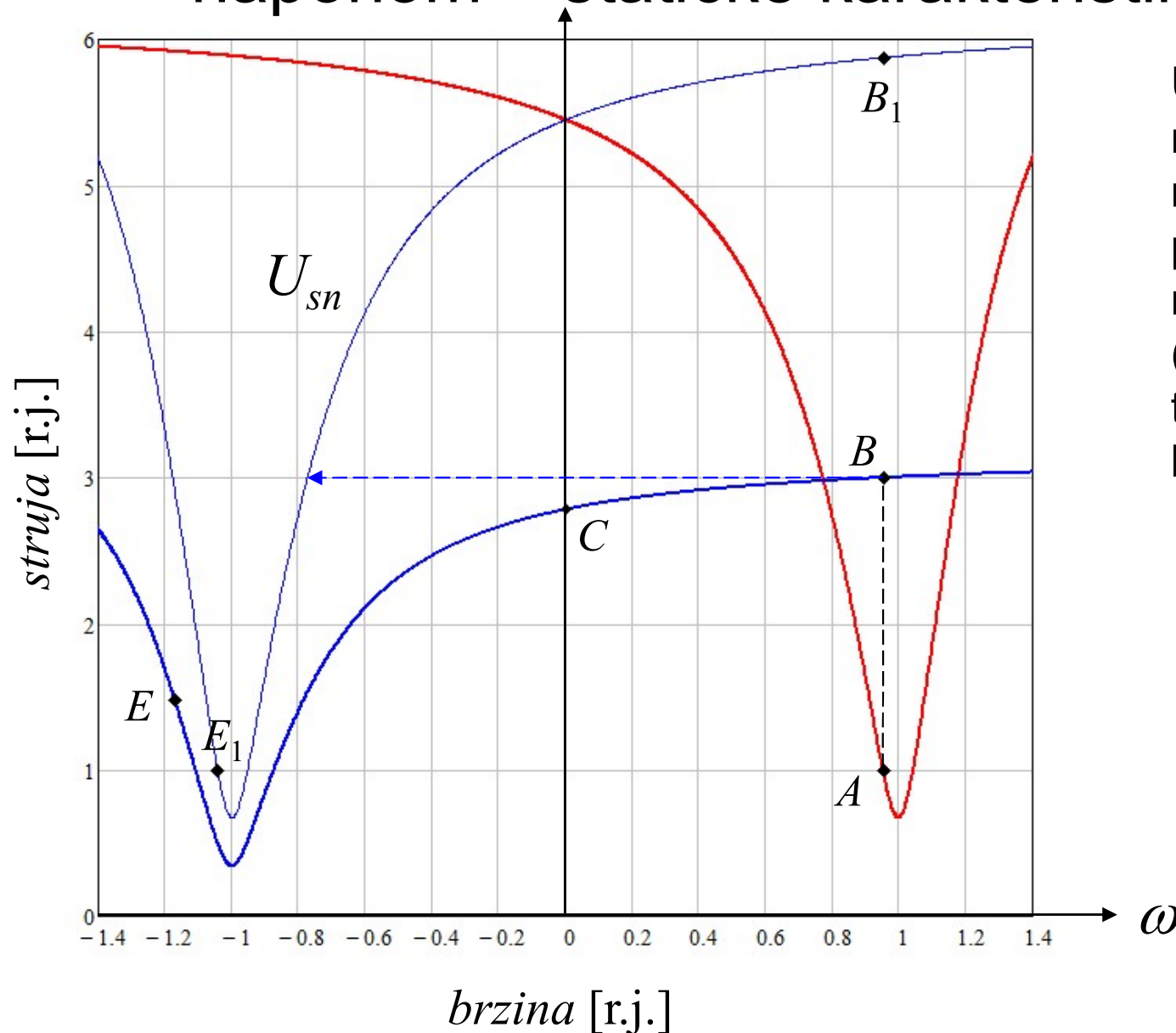
Protivstrujno kočenje (II način) motora sa kaveznim rotorom – statičke karakteristike struja



Mora se naglasiti da je
za vreme protivstrujnog
kočenja (B do C) struja
motora jako velika,
veća od polazne!

Protivstrujno kočenje (II način)

motora sa kaveznim rotorom sa smanjenim naponom – statičke karakteristike struja

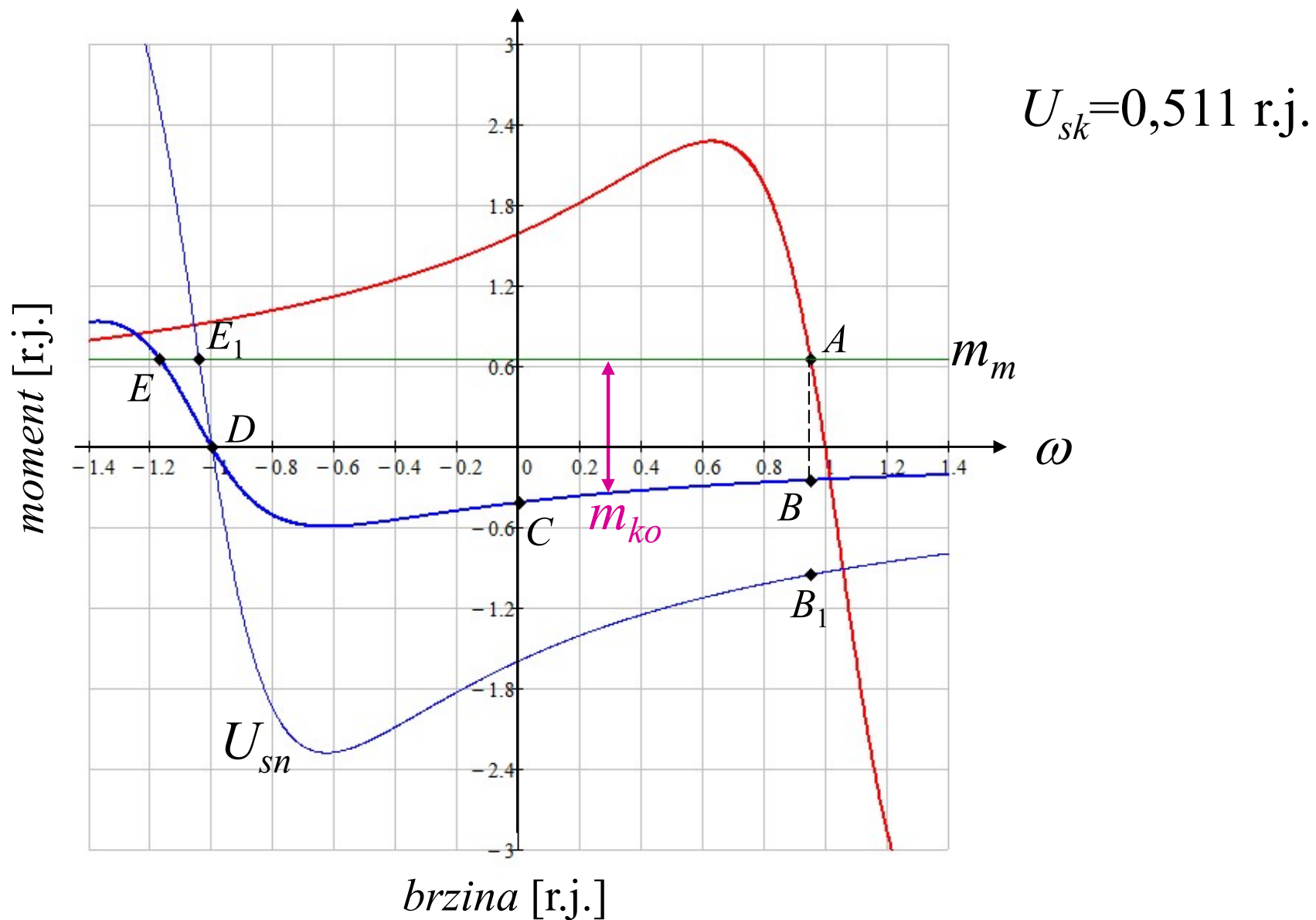


Ukoliko postoji mogućnost smanjenja napona pri protivstrujnom kočenju, može se smanjiti (ograničiti) struja, ali će tako i kočioni moment biti smanjen.

Nakon početka protivstrujnog kočenja, može se postepeno povećavati napon tako da se održava konstantna struja tokom kočenja. U toku zaletanja do negativne brzine, to je isto kao polazak sa ograničenom strujom.

Protivstrujno kočenje (II način)

motora sa kaveznim rotorom sa smanjenim naponom – mehaničke karakteristike



Protivstrujno kočenje (II način) motora sa namotanim rotorom – mehaničke karakteristike

Kod motora sa namotanim rotorom ovaj način kočenja je povoljniji:

1. može se dobiti veći kočioni momenat;
2. struja motora se može ograničiti.

Statičke karakteristike ilustruju primer sa pogonom u kome je motor sa namotanim rotorom.

VAŽNA NAPOMENA: Kod protivstrujnog kočenja motor uzima energiju iz izvora (mreže), ova energija i energija kočenja pretvaraju se u toplotu u motoru i dodatom otporu rotora, ako ovaj postoji.

Protivstrujno kočenje (II način) motora sa namotanim rotorom – mehaničke karakteristike

Kočenje otpočinje ukrštanjem dve faze na statoru i istovremenim uključanjem velikog otpora u kolo rotora, prelazi se iz tačke (A) u tačku (B). Kočioni momenat koji se sada dobija je znatno veći nego u slučaju bez dodavanja otpora. Takođe, dodati otpor ograničava struju i omogućava da se veliki deo energije kočenja disipira (pretvara u toplotu) izvan motora.

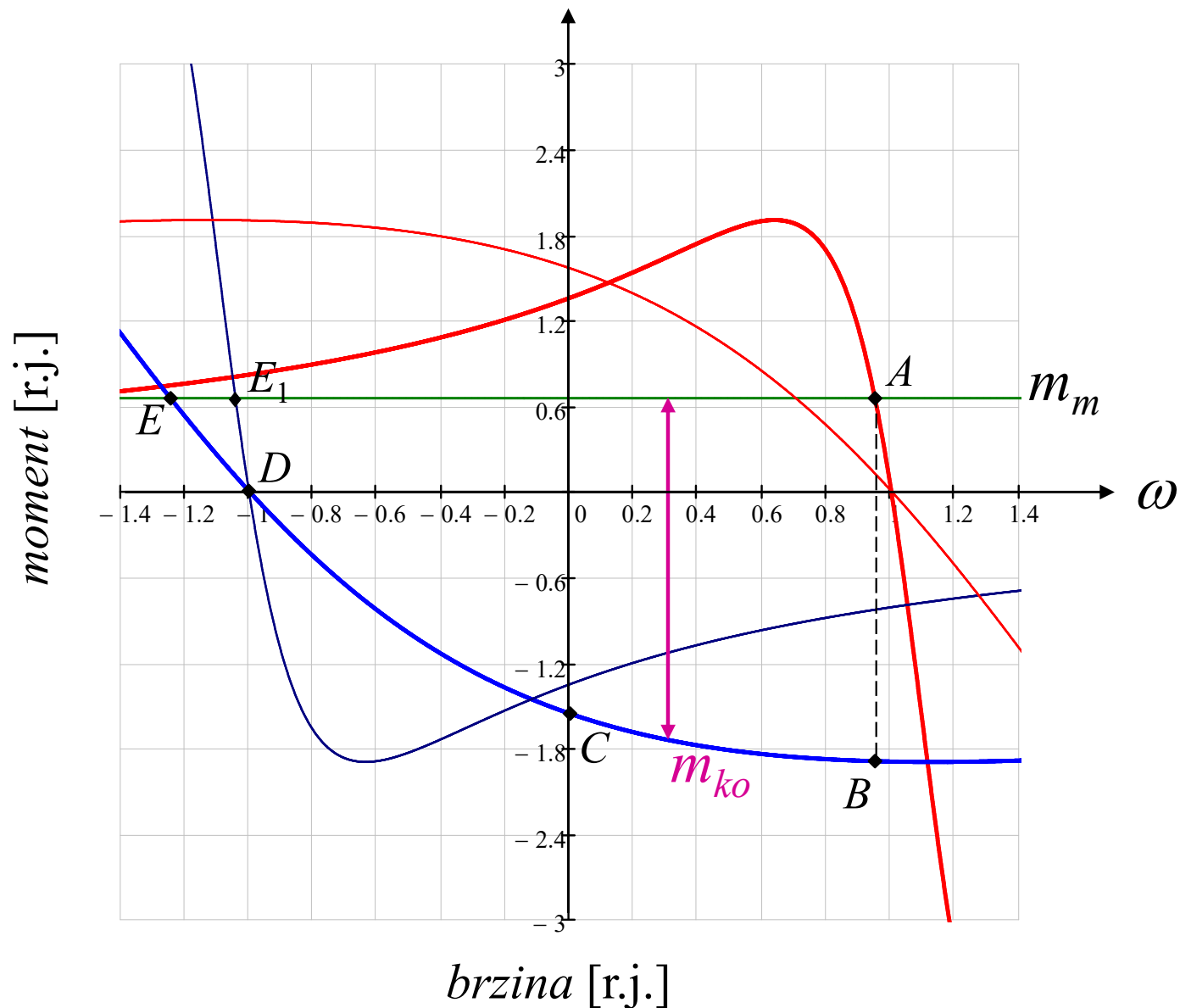
Protivstrujno kočenje se ima između tačaka (B) i (C).

Od (C) do (D) imamo ubrzavanje sa suprotnim smerom obrtanja, u motornom režimu do sinhronne brzine.

Od tačke (D) do tačke (E) imamo dalje ubrzavanje pogona, u režimu rekuperativnog kočenja.

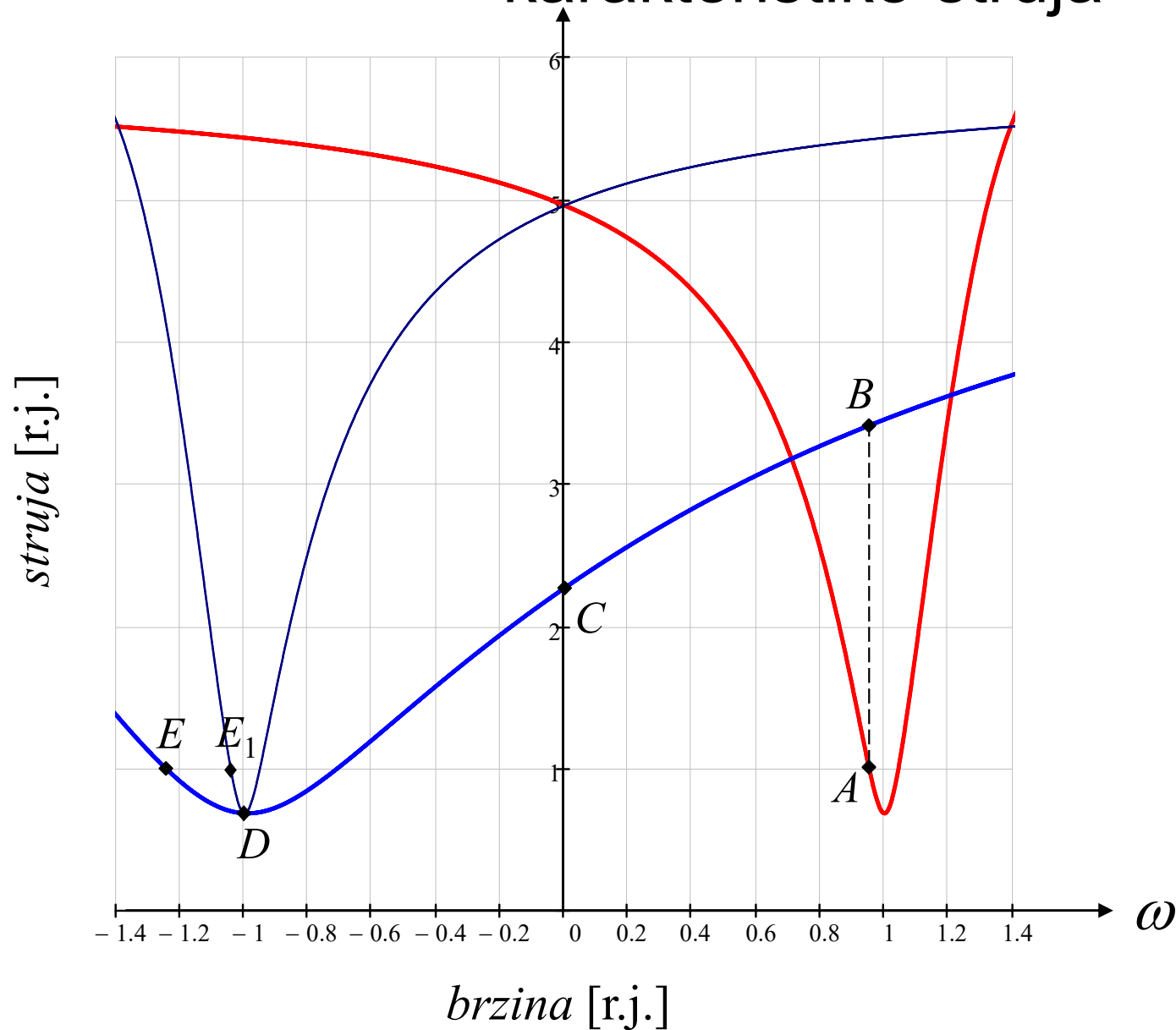
Stacionarno stanje u tački (E) je u režimu rekuperativnog kočenja.

Protivstrujno kočenje (II način) motora sa namotanim rotorom – mehaničke karakteristike



U bilo kom trenutku u periodu rada između tački (C) i (D) može se isključiti (premostiti, kratko spojiti) dodati otpor, čime se povećava moment motora, a time i koeficijent ubrzanja. Ustaljeno stanje koje se tada dobija je na manjoj brzini, tačka (E₁).

Protivstrujno kočenje (II način) motora sa namotanim rotorom – statičke karakteristike struja



Za vreme protivstrujnog kočenja (B do C) struja motora je velika, ali se može ograničiti odgovarajućim izborom vrednosti dodatog otpora.

3. DINAMIČKO KOČENJE

Kočenje jednosmernom strujom

PRINCIP RADA: *Kroz namotaje statora propusti se jednosmerna struja usled čega se u motoru obrazuje nepokretno magnetno polje. Ako se rotor obrće u njemu će se indukovati elektromotorna sila, odnosno uspostaviti struja koja će (čije će polje) sa nepokretnim poljem obrazovati momenat koji se suprotstavlja obrtanju, kočioni momenat. Mašina radi kao sinhroni generator, pri čemu je induktor stator, indukt rotor, a potrošač omski otpor u kolu rotora.*

Odgovarajuće analitičke relacije za opisani režim mogu se dobiti ako se pođe od izraza za struju rotora. :

N:

$$\vec{I}'_r = \frac{j \cdot \omega_r \cdot M}{R'_r + j \cdot \omega_r \cdot (\lambda'_r + M)} \cdot \vec{I}_s = \frac{j \cdot \omega_r \cdot M}{R'_r + j \cdot \omega_r \cdot (\lambda'_r + M)} \cdot \left(\frac{U_s}{R_s} \right)$$

Pošto je učestanost napajanja statora sada $\omega_s=0$, relativna brzina rotora je:

$$\omega_r = -\omega$$

Dinamičko kočenje - kočenje jednosmernom strujom

Analitički izraz za mehaničku karakteristiku motora je:

N:

$$M_e = \frac{R'_r}{\omega_r} \cdot |\vec{I}'_r|^2 = - \frac{\omega \cdot R'_r \cdot M^2}{(R'_r)^2 + \omega^2 \cdot (\lambda'_r + M)^2} \cdot \left(\frac{U_s}{R_s} \right)^2$$

Negativan predznak

Može se pokazati da postoji rešenje jednačine: $\frac{\partial M_e}{\partial \omega} = 0$

Odnosno, da momenat motora pri brzini: $\omega_p = \pm \frac{R'_r}{\lambda'_r + M}$

ima ekstremne vrednosti:

$$M_e = \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{M^2}{(\lambda'_r + M)} \cdot \left(\frac{U_s}{R_s} \right)^2$$

Napon U_s je efektivna vrednost faznog napona napajanja statora, ali kako je $\omega_s=0$ trenutne vrednosti napona po fazama su:

$$u_{sa} = \sqrt{2} \cdot U_s \cos(0^\circ) \xrightarrow{\omega_s=0} u_{sa} = U_s$$

$$u_{sb} = \sqrt{2} \cdot U_s \cos(120^\circ) \xrightarrow{\omega_s=0} u_{sb} = -U_s / 2$$

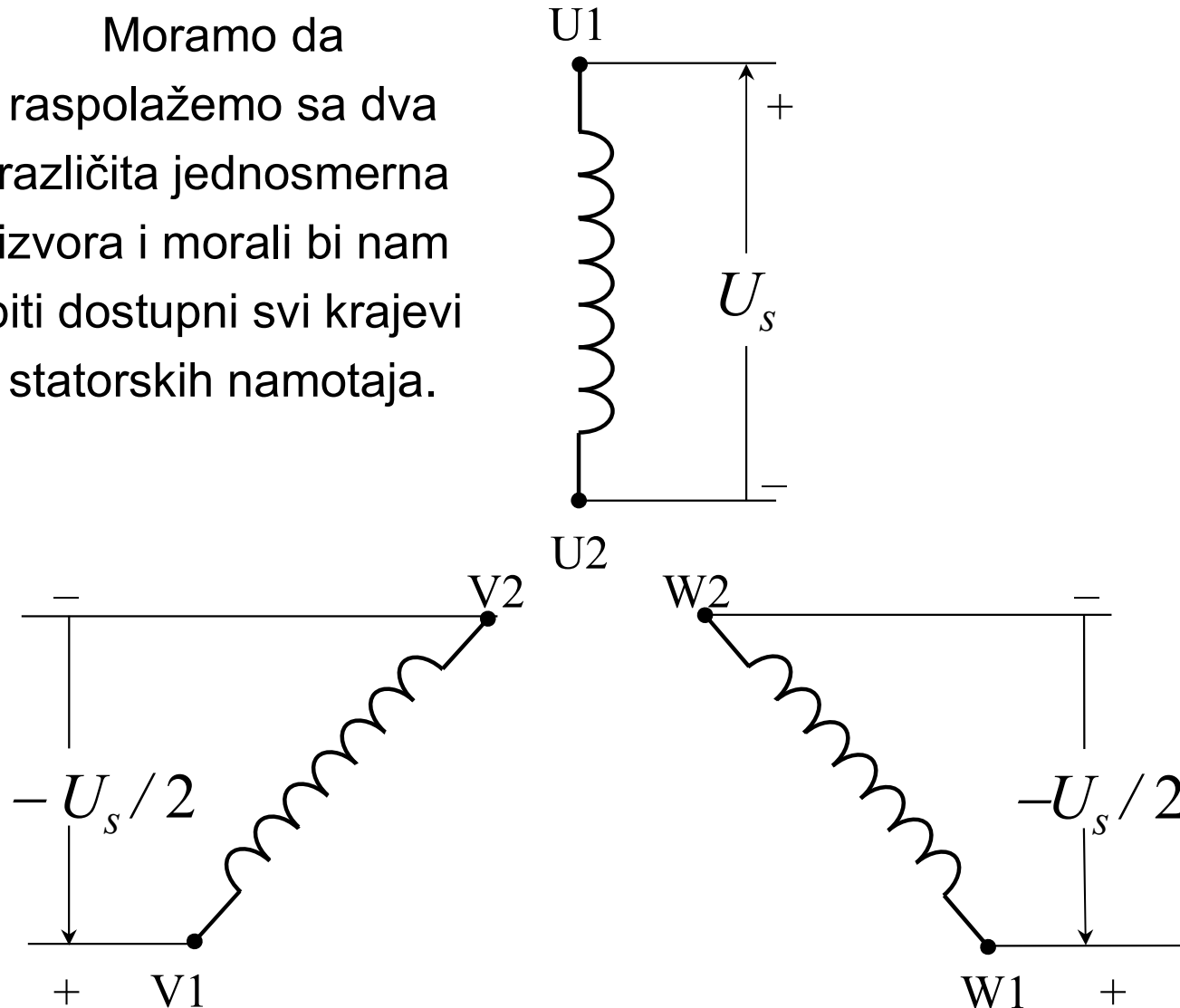
$$u_{sc} = \sqrt{2} \cdot U_s \cos(240^\circ) \xrightarrow{\omega_s=0} u_{sc} = -U_s / 2$$

PRAKTIČNO ovo bi značilo da se na fazu (a) statora mora dovesti jednosmerni napon U_s sa “+” krajem na početku, a “-” krajem na kraju faznog namotaja, dok se na faze (b) i (c) mora dovesti jednosmerni napon $U_s/2$, sa “+” krajem na krajevima, a “-” krajem na početku ovih faznih namotaja.

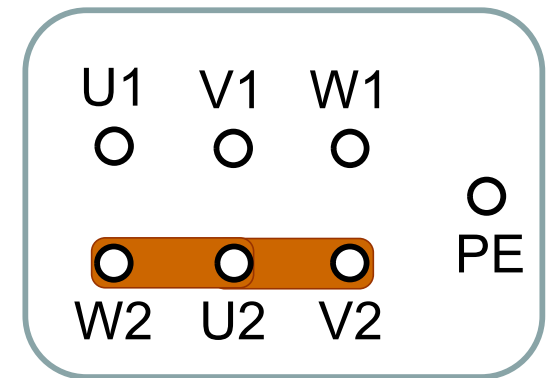
Realizacija ovakvog “*trofaznog jednosmernog*” napajanja bila bi vrlo složena, a time i nepraktična, jer bi morali da raspolažemo sa dva različita jednosmerna izvora i morali bi nam biti dostupni svi krajevi statorskih namotaja.

Dinamičko kočenje kočenje jednosmernom strujom

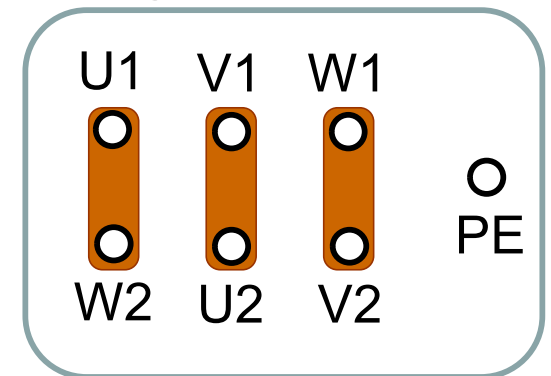
Moramo da
raspoložemo sa dva
različita jednosmerna
izvora i morali bi nam
biti dostupni svi krajevi
statorskih namotaja.



Sprega u ZVEZDU

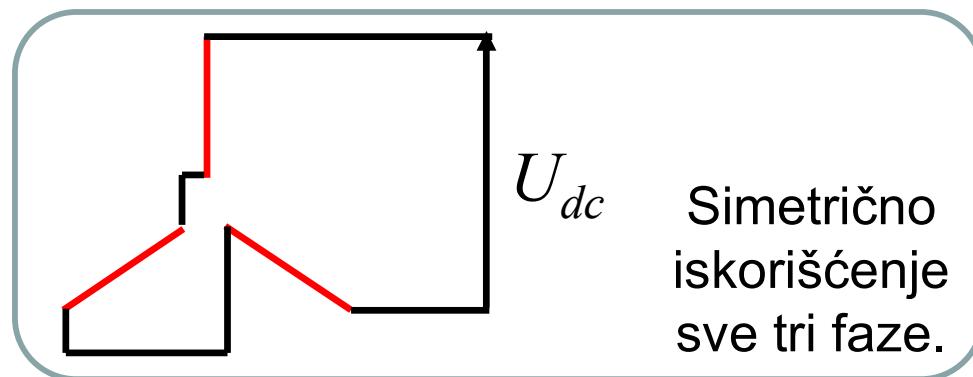
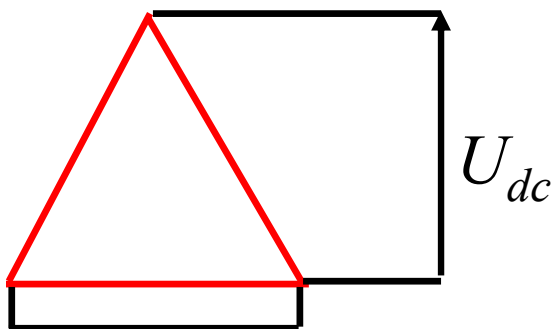
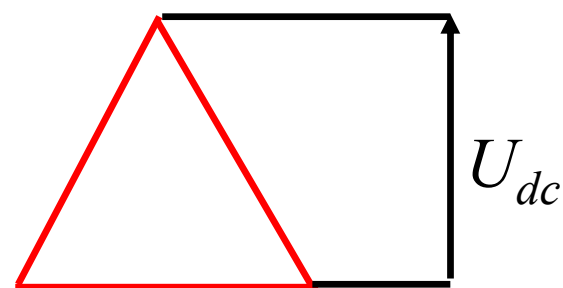
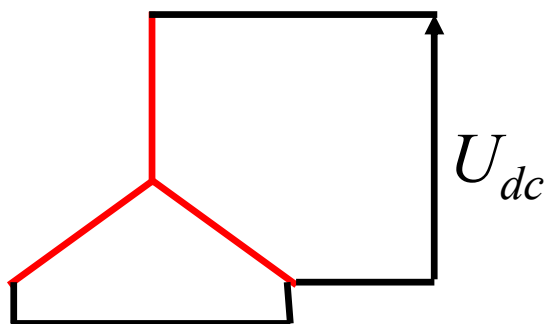
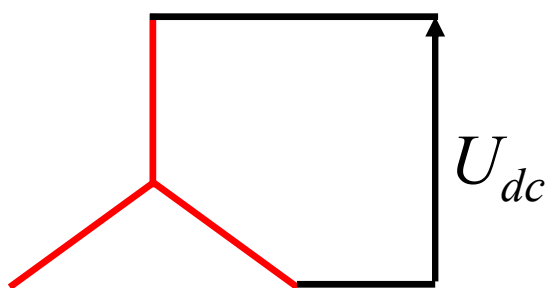


Sprega u TROUGAO



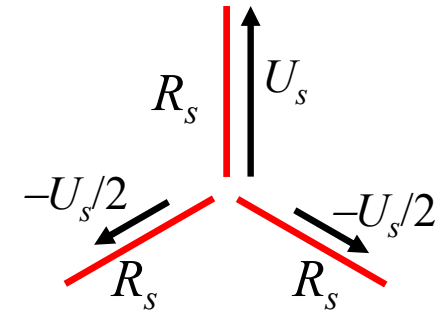
Isti kočioni efekat može se postići i jednostavnim priključivanjem odgovarajućeg jednosmernog napona (U_{dc}) na dva lako dostupna kraja statora.

Vrednost napona U_{dc} koja će dati isti kočioni momenat kao i kod „trofaznog jednosmernog” napajanja određuje se iz jednakih magnetopobudnih sila statora, a zavisice od sprege (načina povezivanja namotaja) statora.



Stator spregnut u *zvezdu*

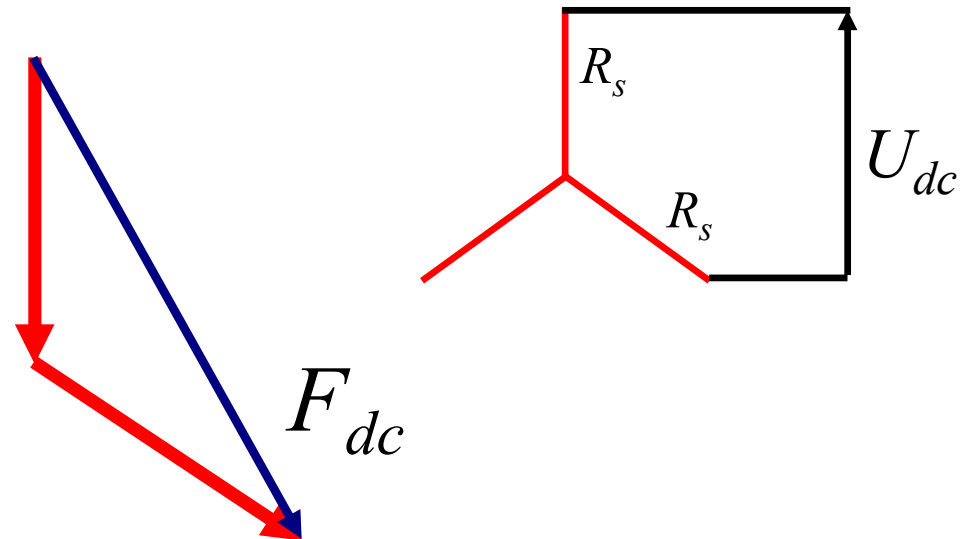
Magnetopobudna sila od „*trofaznog jednosmernog*“ napajanja je:



$$F_{s3} = \frac{U_s}{R_s} \cdot N_s \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cos(120^\circ) - \frac{1}{2} \cos(240^\circ) \right) = \frac{3}{2} \cdot N_s \cdot \frac{U_s}{R_s}$$

Magnetopobudna sila koja se ima kada se *jednosmerni napon* U_{dc} dovede na dva ulazna kraja statorskog namotaja je:

$$F_{dc} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot N_s \cdot \frac{U_{dc}}{R_s}$$



N_s – broj navojaka po fazi

Iz uslova jednakosti:

$$F_{s3} = F_{dc}$$

Dobija se:

$$U_s = \frac{U_{dc}}{\sqrt{3}}$$

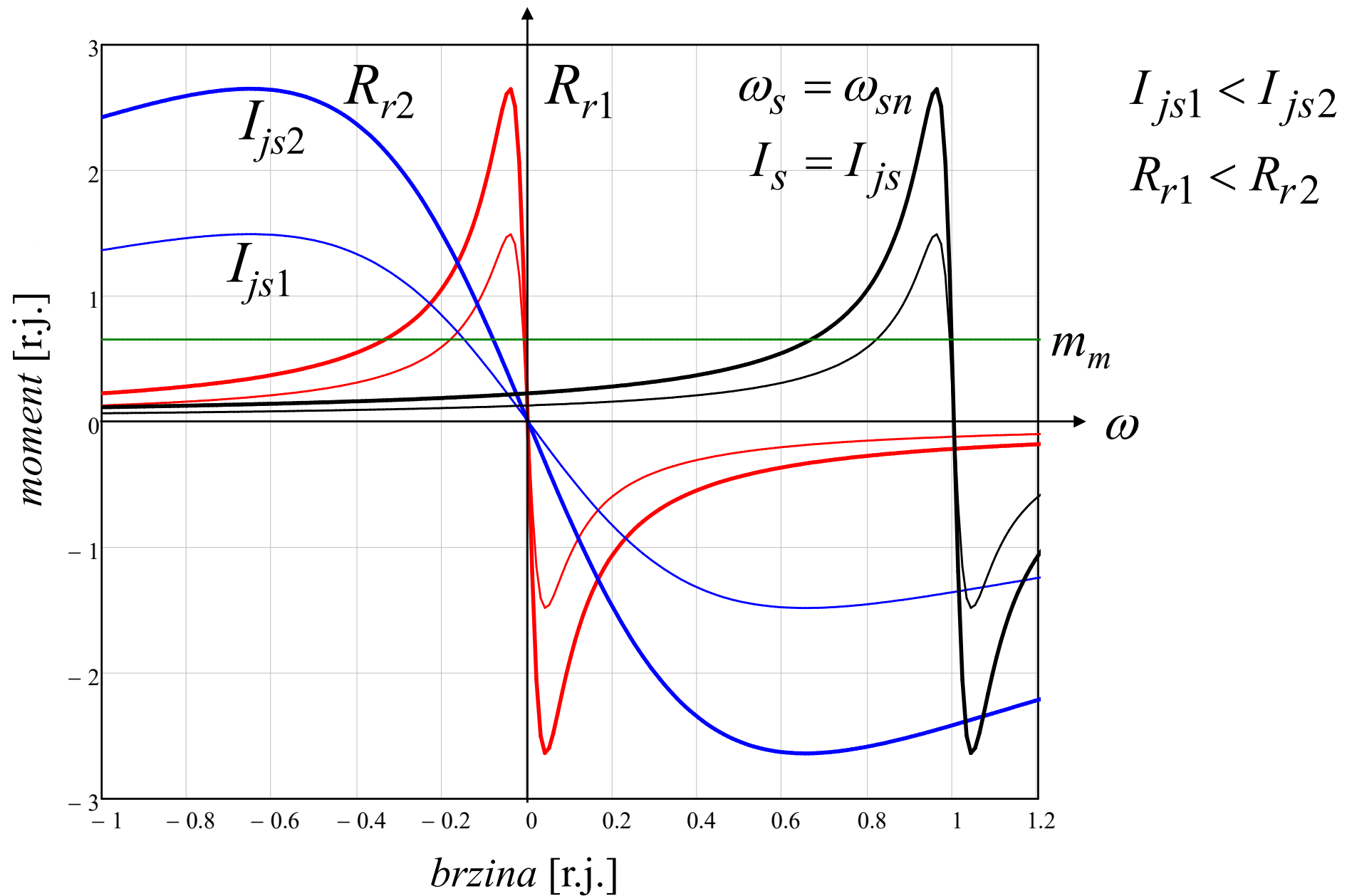
$$M_e = - \frac{\omega \cdot R'_r \cdot M^2}{(R'_r)^2 + \omega^2 \cdot (\lambda'_r + M)^2} \left(\frac{U_{dc}}{\sqrt{3} \cdot R_s} \right)^2$$

Negativan predznak

U cilju poboljšanja efikasnosti kočenja mogu se koristiti i druge sprege (načini vezivanja) namotaja statora.

Na slici su prikazane mehaničke karakteristike motora u režimu dinamičkog kočenja.

Mehaničke karakteristike motora u režimu dinamičkog kočenja



Pogodne mehaničke karakteristike mogu se ostvariti podešavanjem vrednosti jednosmernog napona, odnosno struje i odgovarajućim dodatim otporom rotora (ako je motor sa namotanim rotorom).

Napomena: Izvedeni proračun ne uvažava zasićenje motora, usled koga se vrednost induktivnosti M može značajno menjati. Uvažavanje ovog efekta bitno bi komplikovalo proračune, ali se to zasićenje nekada u praksi mora uzimati u obzir.

Primer: Da bi kod motora snage 3kW maksimalni momenat pri dinamičkom kočenju bio jednak prevalnom momentu na prirodnoj mehaničkoj karakteristici, jednosmerna struja kojom se napaja stator mora biti skoro dva puta veća od nominalne struje.