

# 1 Uporedna analiza osnovnih konvertora

Dosadašnja analiza osnovnih prekidačkih konvertora pokazala je da svaki od njih ima dva režima rada:

**kontinualni (CCM, Continuous Conduction Mode)** u kome dioda provodi tokom celog intervala vremena kada je prekidač isključen i izlazni napon ne zavisi od izlazne struje

**diskontinualni (DCM, Discontinuous Conduction Mode)** u kome dioda provodi samo tokom dela intervala vremena kada je prekidač isključen, a tokom preostalog dela tog intervala ne vode ni prekidač ni dioda; izlazna struja se može izraziti u funkciji izlaznog napona, ulaznog napona, faktora ispunjenosti pobudnih impulsa prekidača  $D$  i parametara kola  $f_S$  i  $L$ .

Granica između kontinualnog i diskontinualnog režima provođenja određena je kritičnom vrednošću struje potrošača, koja je za sva tri osnovna konvertora data sa

$$I_{CRIT} = \frac{V_{IN}}{2f_S L} D(1 - D).$$

Kod buck i boost konvertora izlazna struja je pozitivna i konvertor provodi u kontinualnom režimu ako je  $I_{OUT} > I_{CRIT}$ . U suprotnom, konvertor je u diskontinualnom režimu, za  $I_{OUT} < I_{CRIT}$ . Kod buck-boost konvertora, prema usvojenim referentnim smerovima izlazni napon i izlazna struja su negativni, pa je buck-boost konvertor u kontinualnom režimu za  $-I_{OUT} > I_{CRIT}$ , a u diskontinualnom za  $-I_{OUT} < I_{CRIT}$ . Kako bi za sva tri konvertora uslov koji određuje režim rada imao istu formu, povoljno je kriterijum izraziti u funkciji  $|I_{OUT}|$ , pa je tako konvertor (bilo koji od tri osnovna) u kontinualnom režimu za  $|I_{OUT}| > I_{CRIT}$ , a u diskontinualnom za  $|I_{OUT}| < I_{CRIT}$ . Na granici između dva režima važe jednačine i jednog i drugog režima provođenja, što je povoljno iskoristiti za proveru dobijenih jednačina.

Izrazi za izlazni napon u kontinualnom režimu i izlaznu struju u diskontinualnom režimu rada su za sva tri osnovna konvertora zbirno prikazani u tabeli 1.

Tabela 1: Izrazi za  $V_{OUT}$  u kontinualnom i  $I_{OUT}$  u diskontinualnom režimu rada

konvertor	CCM, $ I_{OUT}  > I_{CRIT}$	DCM, $ I_{OUT}  < I_{CRIT}$
	$V_{OUT}$	$I_{OUT}$
buck	$D V_{IN}$	$\frac{D^2 V_{IN}}{2f_S L} \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{V_{OUT}}$
boost	$\frac{1}{1 - D} V_{IN}$	$\frac{D^2 V_{IN}}{2f_S L} \frac{V_{IN}}{V_{OUT} - V_{IN}}$
buck-boost	$-\frac{D}{1 - D} V_{IN}$	$\frac{D^2 V_{IN}}{2f_S L} \frac{V_{IN}}{V_{OUT}}$

Iz izraza prikazanih u tabeli 1 se uočava da oni osim razlika imaju i puno sličnosti: izlazni napon je u svim slučajevima proizvod ulaznog napona i racionalne funkcije po  $D$ ; u diskontinualnom režimu rada izlazna struja je data kao proizvod  $D^2 V_{IN} / (2f_S L)$  i racionalne funkcije po  $V_{IN}$  i  $V_{OUT}$  koja nema fizičku dimenziju. Ove činjenice otvaraju prostor da se izvrši normalizacija izraza kako bi se pojednostavila njihova forma i kasnija manipulacija.

## 2 Normalizacija

Normalizacija je postupak u kome se fizičke veličine u izrazima predstavljaju neimenovanim brojevima koji se dobijaju deljenjem određene fizičke veličine izabranom baznom (osnovnom) vrednošću (*base quantity*). Bazne vrednosti se biraju tako da imaju istu fizičku dimenziju kao i veličina koju normalizuju i da normalizacija ima neki smisao, npr. pojednostavljenje zapisa izraza. Za izraze date u tabeli 1 povoljno je napone normalizovati prema

$$M_X \triangleq \frac{V_X}{V_{IN}}$$

gde  $M_X$  predstavlja normalizovanu vrednost napona  $V_X$ . Struje je povoljno normalizovati sa

$$J_X \triangleq \frac{2f_S L}{V_{IN}} I_X$$

gde  $J_X$  predstavlja normalizovanu vrednost struje  $I_X$ .

Kada se završi računanje sa normalizovanim izrazima, u fizičku realnost se dobijeni rezultati vraćaju postupkom denormalizacije koji je dat sa

$$V_X = M_X V_{IN}$$

za napone i

$$I_X = J_X \frac{V_{IN}}{2f_S L}$$

za struje.

Osim normalizacije napona i struja, u energetskej elektronici se često normalizuje i vreme. Na primer, faktor ispunjenosti pobudnih impulsa prekidača  $D$  je normalizovano trajanje intervala vremena tokom koga je prekidač uključen u odnosu na periodu prekidanja:  $D \triangleq t_{Son}/T_S$ .

### 3 Normalizovani izrazi za izlazne promenljive

Uvođenjem normalizacije izlazni napon je predstavljen odnosom izlaznog i ulaznog napona

$$M = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$$

koji se još naziva i odnos konverzije (*conversion ratio*). Izlazna struja se predstavlja sa

$$J_{OUT} = \frac{2f_s L}{V_{IN}} I_{OUT}$$

dok se kritična izlazna struja pri kojoj konvertor menja režim provođenja predstavlja jednostavnim izrazom

$$J_{CRIT} = D(1 - D).$$

Normalizovani izrazi za izlazni napon u kontinualnom i izlaznu struju u diskontinualnom režimu rada za tri osnovna prekidačka konvertora su prikazani u tabeli 2 i po formi su jednostavniji od izraza iz tabele 1. Osim toga, broj promenljivih je smanjen: izrazi iz tabele 2 povezuju  $M$ ,  $D$  i  $J_{OUT}$ , dok su u izrazima u tabeli 1 učestvovali  $V_{IN}$ ,  $V_{OUT}$ ,  $D$ ,  $f_s$ ,  $L$  i  $I_{OUT}$ . Dakle, broj promenljivih je sa šest sveden na tri.

Tabela 2: Normalizovani izrazi za  $M$  u kontinualnom i  $J_{OUT}$  u diskontinualnom režimu rada

konvertor	CCM, $ J_{OUT}  > J_{CRIT}$	DCM, $ J_{OUT}  < J_{CRIT}$
	$M$	$J_{OUT}$
buck	$D$	$D^2 \frac{1 - M}{M}$
boost	$\frac{1}{1 - D}$	$D^2 \frac{1}{M - 1}$
buck-boost	$-\frac{D}{1 - D}$	$D^2 \frac{1}{M}$

## 4 Izrazi za izlazni napon u zavisnosti od izlazne struje i $D$

Normalizovani izrazi dati u tabeli 2 su povoljni za manipulaciju i analizu. Prva analiza koja će biti prikazana daje normalizovan izlazni napon u funkciji  $J_{OUT}$  i  $D$ . Rešavanjem izraza za  $J_{OUT}$  u diskontinualnom režimu po  $M$ , dobijaju se izrazi dati u tabeli 3. Izrazi omogućavaju direktno izračunavanje izlaznog napona konvertora ako su opterećenje  $J_{OUT}$  i upravljačka promenljiva  $D$  poznati.

Tabela 3: Izrazi za  $M$  u kontinualnom i diskontinualnom režimu rada u zavisnosti od  $J_{OUT}$  i  $D$

konvertor	CCM, $ J_{OUT}  > J_{CRIT}$ $M_{CCM}$	DCM, $ J_{OUT}  < J_{CRIT}$ $M_{DCM}$
buck	$D$	$\frac{D^2}{D^2 + J_{OUT}}$
boost	$\frac{1}{1 - D}$	$1 + \frac{D^2}{J_{OUT}}$
buck-boost	$-\frac{D}{1 - D}$	$\frac{D^2}{J_{OUT}}$

Rezultati iz tabele 3 su predstavljeni na slikama 1, 2 i 3 kao parametarske familije krivih  $M(J_{OUT})$  sa  $D$  kao parametrom. Na slikama je prikazana i granica između kontinualnog i diskontinualnog režima rada kao kriva  $J_B(M_B)$  prikazana crvenom linijom u  $M(J_{OUT})$  ravni. Kriva se dobija izražavanjem  $D$  u  $J_{CRIT} = D(1 - D)$  preko  $M$  prema izrazu za  $M(D)$  za odgovarajući konvertor u kontinualnom režimu rada, koji važi i na granici između dva režima, kako je već bilo napomenuto. Ovako su određene granice između režima rada u  $M(J_{OUT})$  ravni i to

$$J_B = M_B(1 - M_B)$$

za buck konvertor,

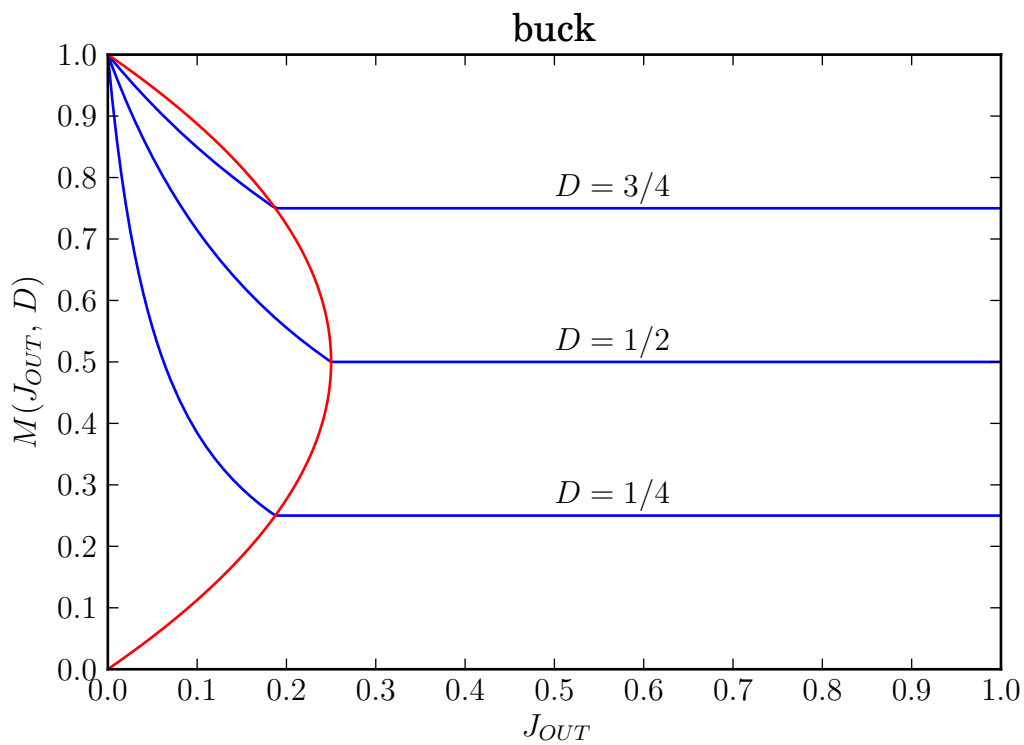
$$J_B = \frac{M_B - 1}{M_B^2}$$

za boost konvertor, i

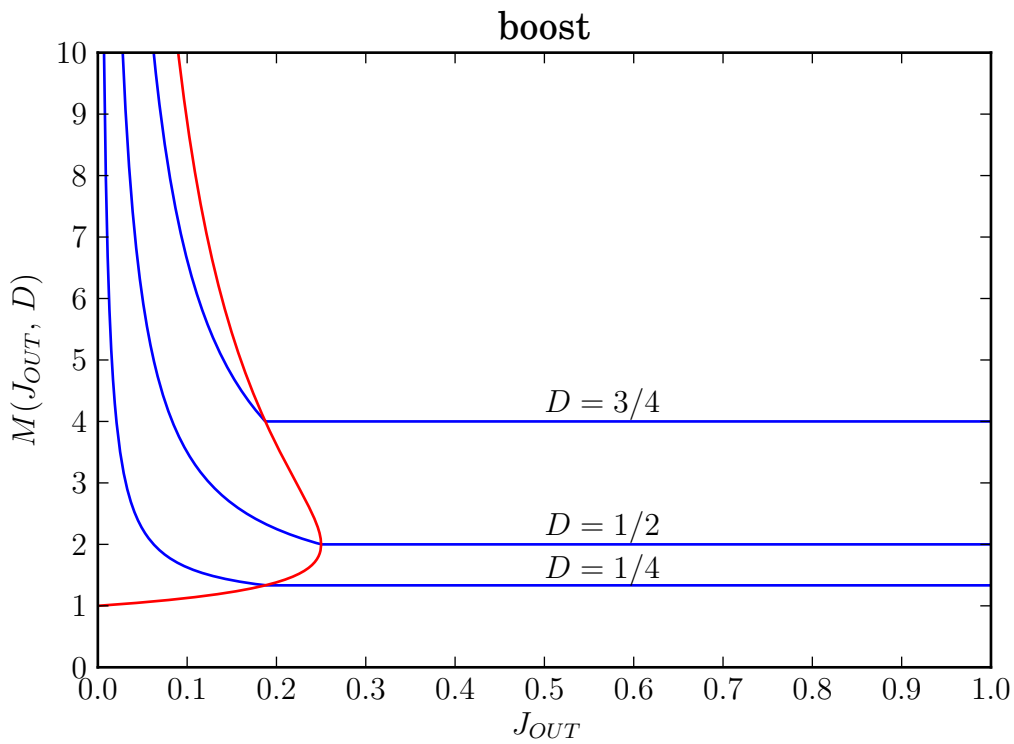
$$J_B = \frac{M_B}{(M_B - 1)^2}$$

za buck-boost konvertor. Indeks  $B$  (boundary) je korišćen da označi da je reč o vrednostima na granici između dva režima rada.

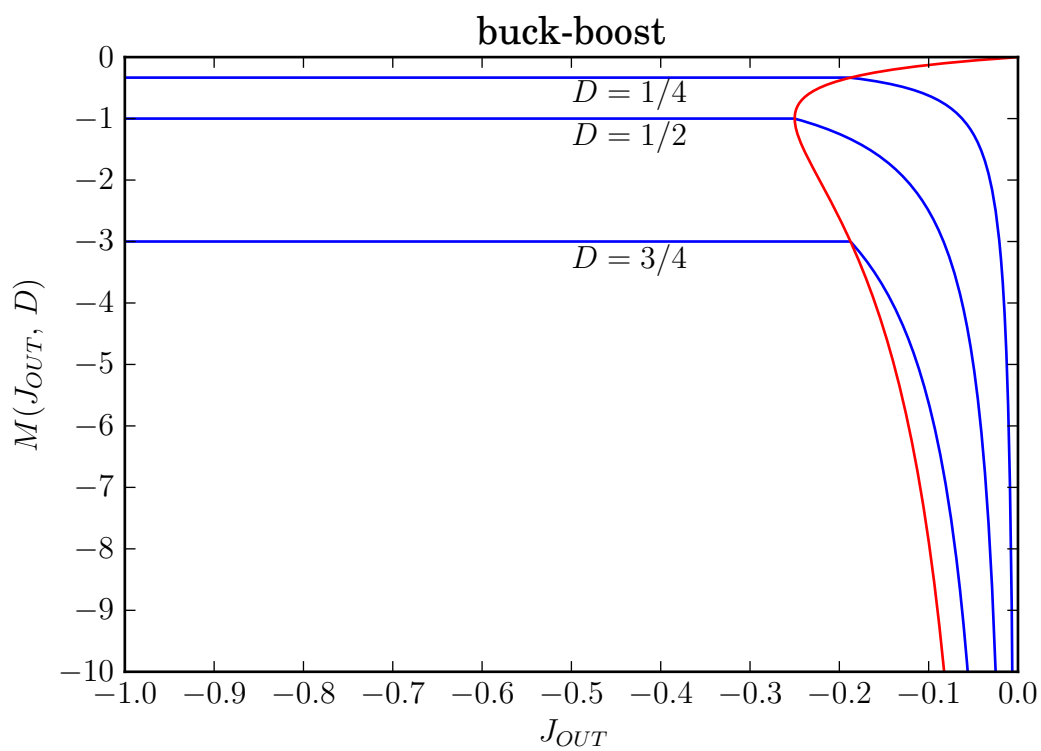
Prikazani rezultati opisuju uobičajena laboratorijska ispitivanja konvertora, kada se zadaje  $D$  kao konstanta, a varira izlazna struja. Vidi se da je kod buck konvertora za zadato  $D$  izlazni napon ograničen na  $V_{OUT} \leq V_{IN}$ , dok kod boost i buck-boost konvertora  $|V_{OUT}| \rightarrow \infty$  kada  $J_{OUT} \rightarrow 0$ , pa valja biti oprezan da pri upravljanju sa konstantnim  $D$  ne dođe do isključivanja potrošača.



Slika 1: Buck konvertor,  $M(J_{OUT}, D)$



Slika 2: Boost konvertor,  $M(J_{OUT}, D)$



Slika 3: Buck-boost konvertor,  $M(J_{OUT}, D)$

## 5 Izrazi za $D$ u zavisnosti od izlazne struje i izlaznog napona

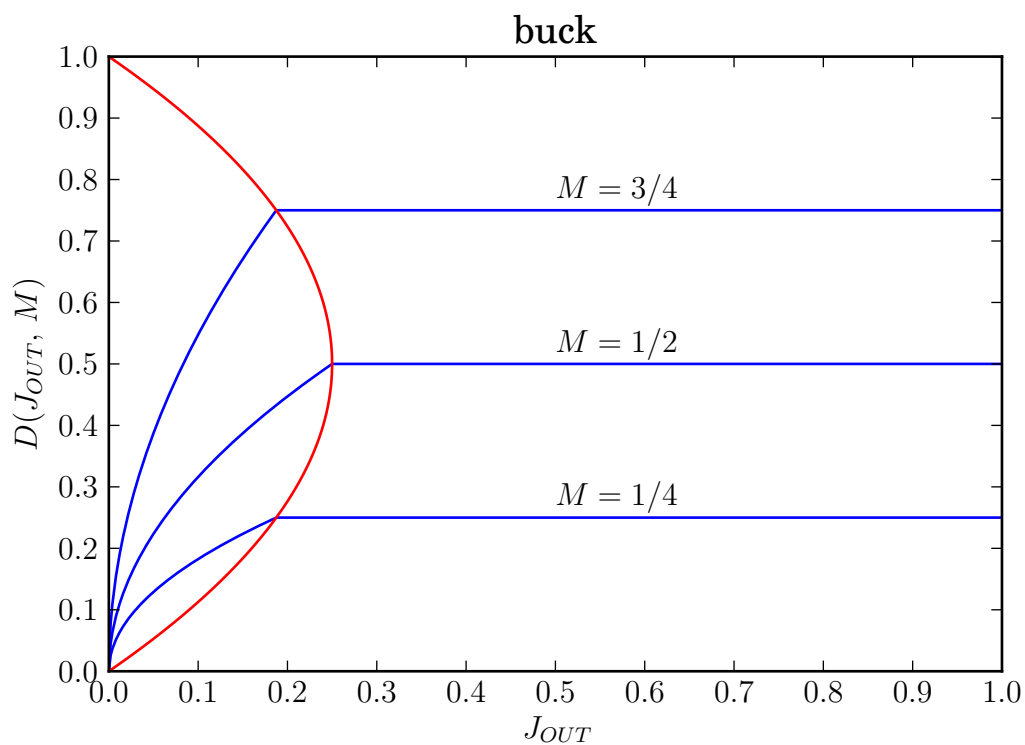
U odnosu na izraze prikazane u prethodnom poglavlju, za praksu su mnogo značajniji izrazi u kojima se  $D$  daje u funkciji zadanog  $M$  i  $J_{OUT}$ , pošto se u praksi gotovo uvek zahteva da konvertor ima sistem automatskog upravljanja koji promenom  $D$  održava izlazni napon konstantnim, bez obzira na promene izlazne struje. Stoga je povoljno izraze za  $M$  i  $J_{OUT}$  iz tabele 2 rešiti po  $D$ . Ovakva transformacija izraza je prikazana u tabeli 4. Takođe, u tabeli su dati izrazi za  $J_{CRIT}$  pri kojoj se konvertor nalazi na granici između kontinualnog i diskontinualnog režima rada izraženi preko  $M$  za odgovarajući konvertor. Izrazi se dobijaju slično kao granična kriva  $J_B(M_B)$  u prethodnoj analizi, uz izuzetak znaka kod buck-boost konvertora, pošto je  $J_{CRIT}$  definisano tako da  $J_{CRIT} > 0$ .

Iz izraza prikazanih u tabeli 4 se vidi da u kontinualnom režimu fiksiranoj vrednosti  $M$  odgovara fiksirana vrednost  $D$  (što u praksi nije sasvim tačno, zbog gubitaka će  $D$  malo zavisiti od  $J_{OUT}$ ), dok u diskontinualnom režimu za sva tri konvertora je  $D$  proporcionalno  $\sqrt{J_{OUT}}$ .

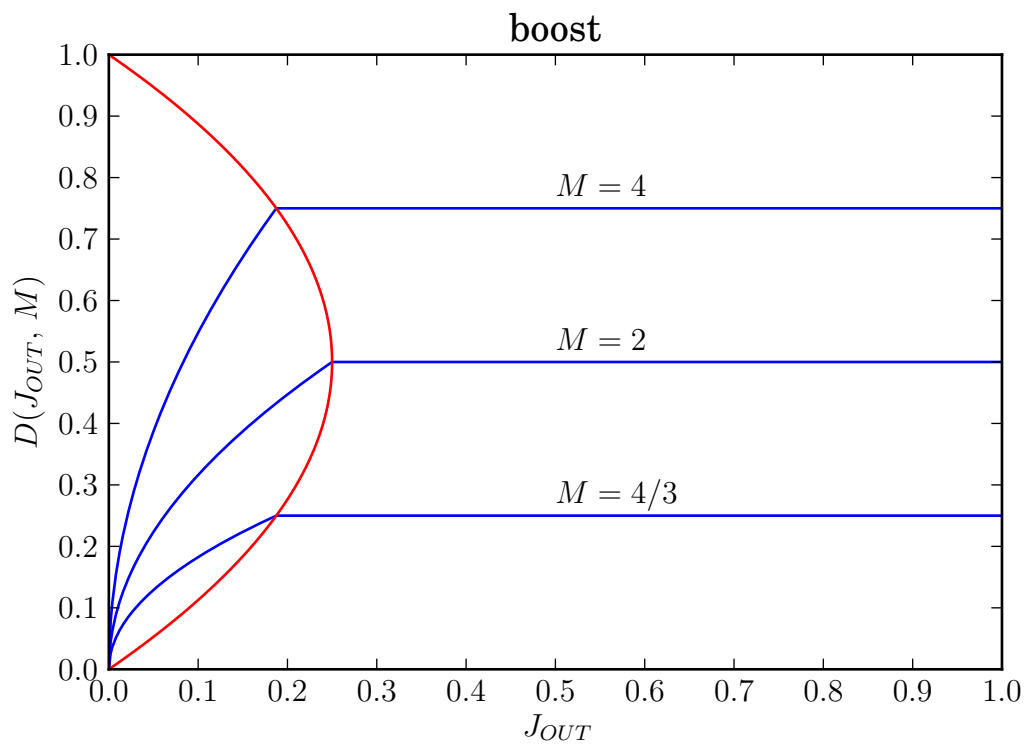
Tabela 4: Izrazi za  $D$  u kontinualnom i diskontinualnom režimu rada u zavisnosti od  $J_{OUT}$  i  $M$

konvertor	CCM, $ J_{OUT}  > J_{CRIT}$	DCM, $ J_{OUT}  < J_{CRIT}$	$J_{CRIT}$
	$D_{CCM}$	$D_{DCM}$	
buck	$M$	$\sqrt{\frac{M}{1-M} J_{OUT}}$	$M(1-M)$
boost	$\frac{M-1}{M}$	$\sqrt{(M-1) J_{OUT}}$	$\frac{M-1}{M^2}$
buck-boost	$-\frac{M}{M-1}$	$\sqrt{M J_{OUT}}$	$-\frac{M}{(M-1)^2}$

Na osnovu rezultata iz tabele 4 prikazana je zavisnost  $D(J_{OUT})$  kao parametarska familija krivih sa  $M$  kao parametrom za sva tri osnovna konvertora na slikama 4, 5 i 6. Na krivima je crvenom linijom ucrtana granica između kontinualnog i diskontinualnog režima rada  $J_B = D_B(1 - D_B)$  za buck i boost konvertor, odnosno  $J_B = -D_B(1 - D_B)$  za buck-boost konvertor. Krive su za sva tri konvertora po obliku veoma slične, ali odgovaraju veoma različitim vrednostima parametra  $M$  u zavisnosti od tipa konvertora.

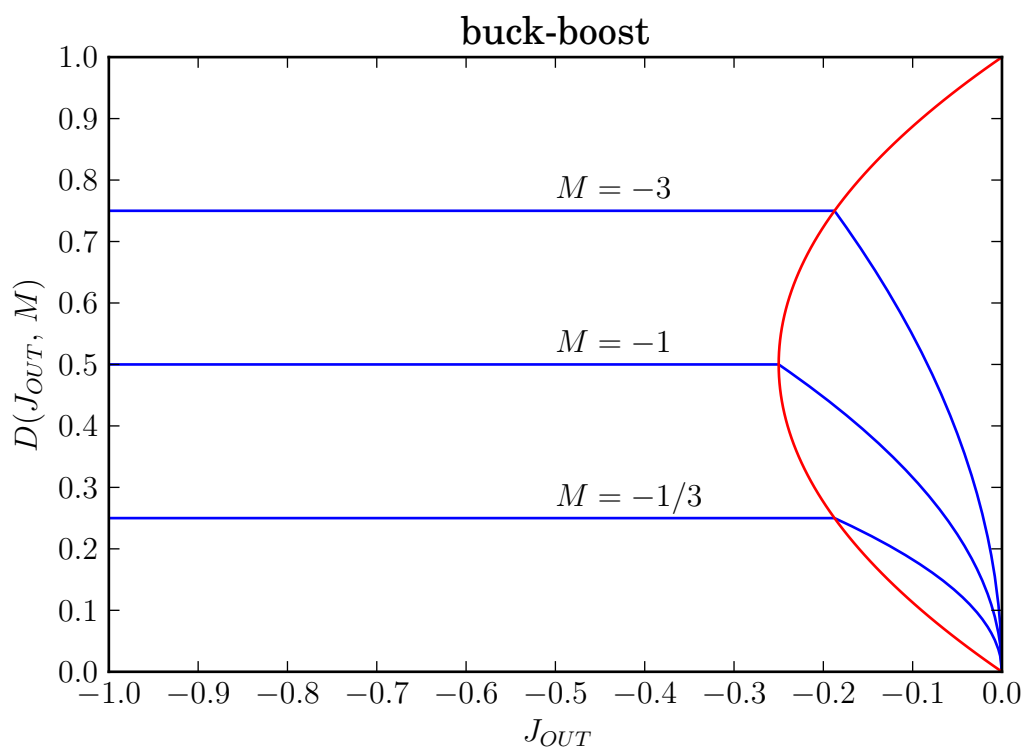


Slika 4: Buck konvertor,  $D(J_{OUT}, M)$



Slika 5: Boost konvertor,  $D(J_{OUT}, M)$





Slika 6: Buck-boost konvertor,  $D(J_{OUT}, M)$