

Forward konvertor

Kod prethodno razmatranog flyback konvertora uvođenjem transformatora postignuta su dva cilja: obezbeđeno je galvansko razdvajanje i kod velikih razlika između ulaznog i izlaznog napona omogućena je konverzija sa umerenim vrednostima D , ni previše malim, ni previše velikim. Na taj način je transformator podelio konvertor na dve galvanski odvojene celine, niskonaponsku i visokonaponsku. Mana flyback konvertora koja uslovljava njegovu primenu pretežno na manjim snagama je veličina transformatora. Magnetizaciona induktivnost transformatora ima značajnu ulogu u prenosu energije, pošto se u prvom delu periode energija smešta u magnetizacionu induktivnost, da bi se u drugom delu periode iz magnetizacione induktivnosti prenosila na izlaz. Ovakav način rada uslovljava relativno velike dimenzije transformatora i zahteva posebno jezgro koje ima vazdušni procep u kome se energija smešta. Prednost flyback konvertora je jednostavna konstrukcija sa malim brojem elemenata.

U cilju smanjenja transformatora i direktnog prenosa energije sa ulaza na izlaz, ima smisla razmotriti i druge mogućnosti realizacije konvertora sa galvanskom izolacijom.

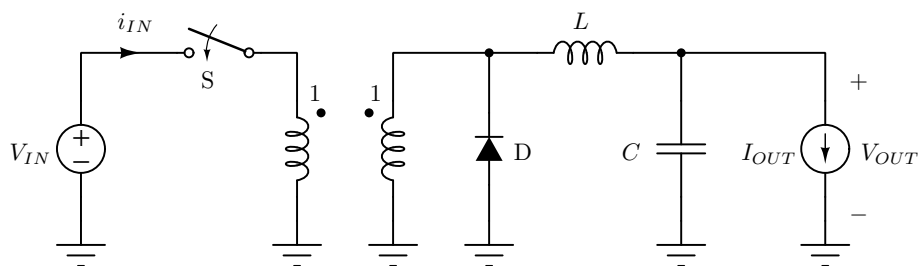
Nastanak forward konvertora

Kod izvođenja flyback konvertora, transformator je postavljen paralelno kalemu buck-boost konvertora, gde prirodno nema jednosmerne komponente napona jer to uslovljava kalem. Sada ćemo pokušati da uvedemo galvansku izolaciju kod buck konvertora, gde pogodno mesto za uvođenje transformatora, paralelno vezano kalemu, ne postoji. Za početak, smatraćemo da raspoložemo idealnim transformatorom, a posle ćemo pokušati da rešimo probleme koje izaziva nužno prisutna magnetizaciona induktivnost.

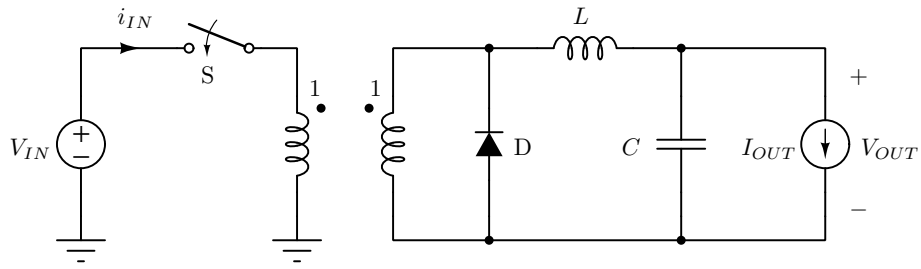
Prvi korak u izvođenju konvertora, koji će kasnije biti nazvan forward konvertor, jeste umetanje transformatora u buck konvertor kako je prikazano na slici 1. Za početak ćemo smatrati da je umetnuti transformator idealan i nećemo se osvrnuti na nesrećnu činjenicu da takav transformator nije u praksi dostupan, već ćemo efekte koje uzrokuje magnetizaciona induktivnost rešavati kasnije. Dakle, u ovom slučaju nećemo odustati kod prve teškoće.

Kod konvertora sa slike 1 izmena u funkcionisanju u odnosu na običan buck konvertor nema. Pretpostavljeno je da je umetnuti transformator prenosnog odnosa $1 : 1$, pa su sve relevantne struje i naponi ostali isti kao i kod polaznog buck konvertora.

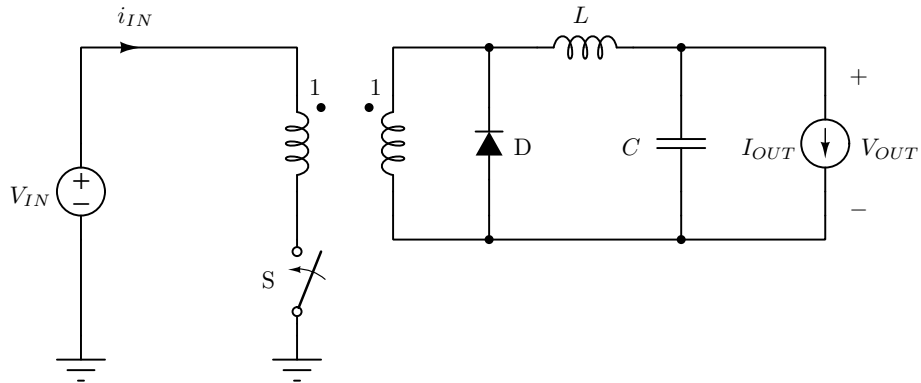
Sledeći korak u izvođenju je „razvezivanje mase“, kako je to urađeno u konvertoru sa slike 2. Na ovaj način je postignuta galvanska izolacija. Sa tačke gledišta teorije električnih kola, konvertor sa slike 2 nije „dobro definisano kolo“ jer mu se graf sastoji iz dva disjunktne subgrafa, pa kolo nema jednoznačno rešenje. Postojanje beskonačnog broja rešenja je upravo i bio cilj uvođenja galvanske izolacije, kako bi potencijali izlaza slobodno „plivali“ u odnosu na ulaz.



Slika 1: Nastanak forward konvertora: uvođenje transformatora.



Slika 2: Nastanak forward konvertora: galvansko razdvajanje.

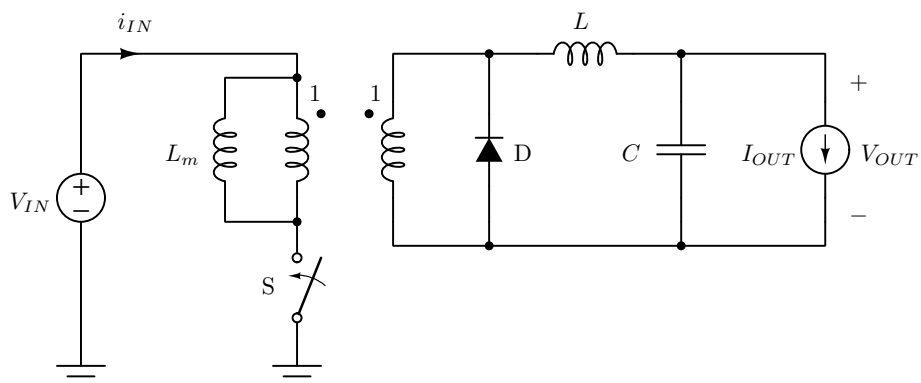


Slika 3: Nastanak forward konvertora: premeštanje prekidača kako bi se izbegao high side driver.

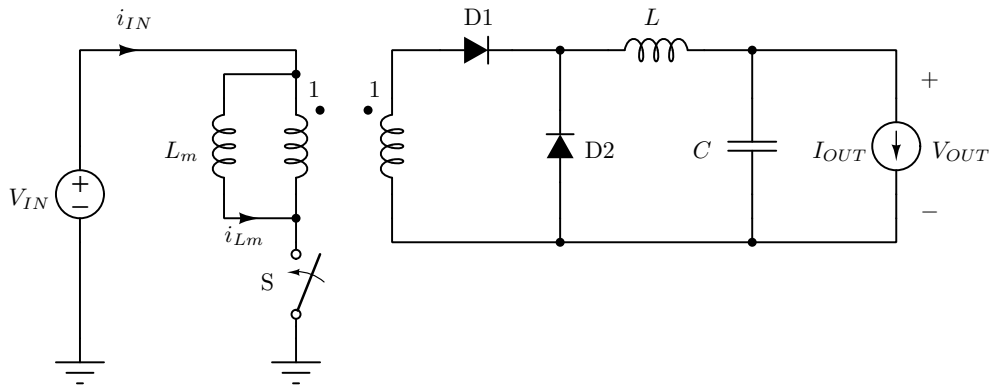
Kada je izvršena galvanska izolacija, prva otvorena mogućnost koju ćemo iskoristiti je zamena mesta primara umetnutog transformatora i prekidača, kako je prikazano na slici 3. Na ovaj način je prekidač jednim krajem vezan za masu, čime se izbegava high side driver. Ovim je postignuto šta se inicijalno moglo postići i sada se moramo suočiti sa ograničenjima koja nameće magnetizaciona induktivnost.

U kolo sa slike 4 je uvedena magnetizaciona induktivnost, čime je model razmatranog transformatora sa idealnog izmenjen na savršen, što je znatno bliže realnosti. Prvo što uočavamo je da je napon na magnetizacionoj induktivnosti jednak naponu na diodi. Srednja vrednost napona na magnetizacionoj induktivnosti u ustaljenom složenoperiodičnom režimu je jednaka nuli, a idealna dioda dopušta samo jedan polaritet napona na svojim krajevima. Stoga, kako bi ovo kolo moglo da funkcioniše u ustaljenom režimu potrebno je diodu odvojiti od transformatora, ne sme mu biti paralelno vezana.

Odvajanje diode D sa slike 4 je postignuto uvođenjem diode D1 u kolo sa slike 5, dok je dioda D preimenovana u D2. Sekundar transformatora sa diodama D1 i D2 sada čini jednostrani



Slika 4: Nastanak forward konvertora: uvođenje magnetizacione induktivnosti.



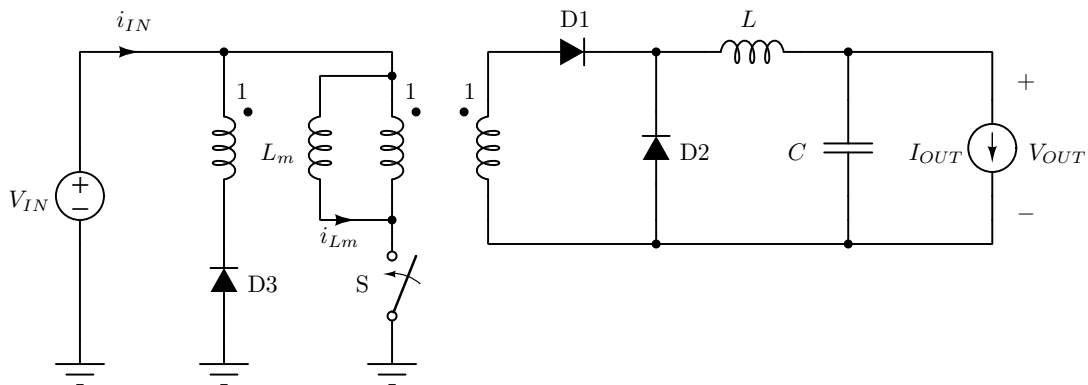
Slika 5: Nastanak forward konvertora: omogućavanje negativnih napona na magnetizacionoj induktivnosti uvođenjem diode D1.

ispravljač koji je strujno opterećen L filtrom koga čine kalem L i kondenzator C , na koji je paralelno vezan potrošač. Ovakva konfiguracija konvertora, koja se na izlazu sastoji od ispravljača, bilo jednostranog, bilo dvostranog, L filtra i potrošača naziva se “buck derived” i oni se često sreću u praksi, a razmatranje još tri tipa ovih konvertora će biti izvršeno nakon analize forward konvertora.

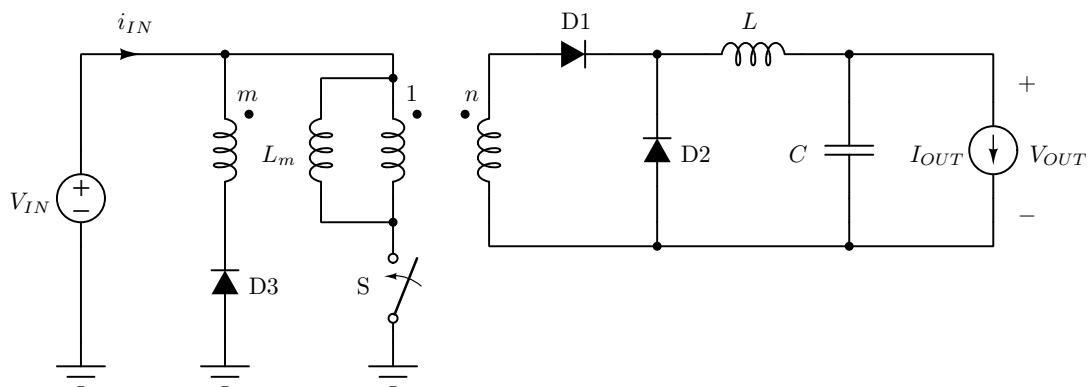
U konvertoru sa slike 5 je rešen problem potrebe da napon na namotajima transformatora bude bipolarni kako bi njegova srednja vrednost mogla da bude jednaka nuli. Međutim, problem demagnetizacije jezgra nije rešen. Tokom intervala vremena kada je uključen prekidač S , struja magnetizacije i_{Lm} je dostigla neku pozitivnu vrednost, podrazumevano je $V_{IN} > 0$. Otvaranjem prekidača S ova struja ne može više da bude komponenta struje prekidača, pa jedina mogućnost da nastavi da teče je kroz primar idealnog transformatora. Kako bi se zadovoljio amper navojak (“ampere-turn”) balansa idealnog transformatora, struja koja na primaru izlazi iz tačke bi morala da ulazi u tačku na sekundaru. To će onemogućavati dioda $D1$ koja je morala biti uvedena u cilju omogućavanja oba polariteta napona na namotajima transformatora. Stoga, potrebno je omogućiti neki drugi način za protok struje magnetizacione induktivnosti i demagnetizaciju jezgra.

Jedan od načina za omogućavanje protoka struje magnetizacione induktivnosti i demagnetizaciju jezgra je uvođenje demagnetizacionog namotaja i pomoćne diode za demagnetizaciju $D3$, kako je prikazano na slici 6. Valja naglasiti da je to samo jedna od mogućnosti za demagnetizaciju jezgra, kasnije će biti obrađena još jedna.

U konvertoru sa slike 6 tokom provođenja prekidača dioda $D3$ će biti inverzno polarisana i demagnetizacioni namotaj neće imati nikakvog efekta, kroz njega neće proticati struja.



Slika 6: Nastanak forward konvertora: uvođenje demagnetizacionog namotaja i pomoćne diode za demagnetizaciju.



Slika 7: Nastanak forward konvertora, dodatni stepeni slobode: promena prenosnih odnosa transformatora.

Kada se prekidač otvori, provođenje struje kalema će preuzeti dioda D2, a provođenje struje magnetizacione induktivnosti će preuzeti dioda D3, preko pomoćnog namotaja idealnog transformatora. Tokom periode, struja diode D3 treba da padne na nulu, što znači da je demagnetizacija jezgra uspešno obavljena. Ovo je ekvivalentno uslovu da struja magnetizacione induktivnosti ima diskontinualan tok, da postoji interval vremena u okviru svake periode u kome je struja magnetizacione induktivnosti jednaka nuli, odnosno kada je jezgro razmagnetisano, čime je jezgro transformatora spremno za novi prekidački ciklus. U slučaju da navedeni uslov nije ispunjen, već da nakon prekidačkog ciklusa ostane neka struja magnetizacione induktivnosti, ona bi se tokom svakog prekidačkog ciklusa dalje povećavala, što bi zasitilo jezgro transformatora. Tada namotaji transformatora više ne bi imali indukovane elektromotorne sile i ponašali bi se približno kao kratki spojevi, što bi najverovatnije dovelo do pregorevanja prekidača zbog prevelike struje, ukoliko dovoljnu struju izvor V_{IN} može da obezbedi.

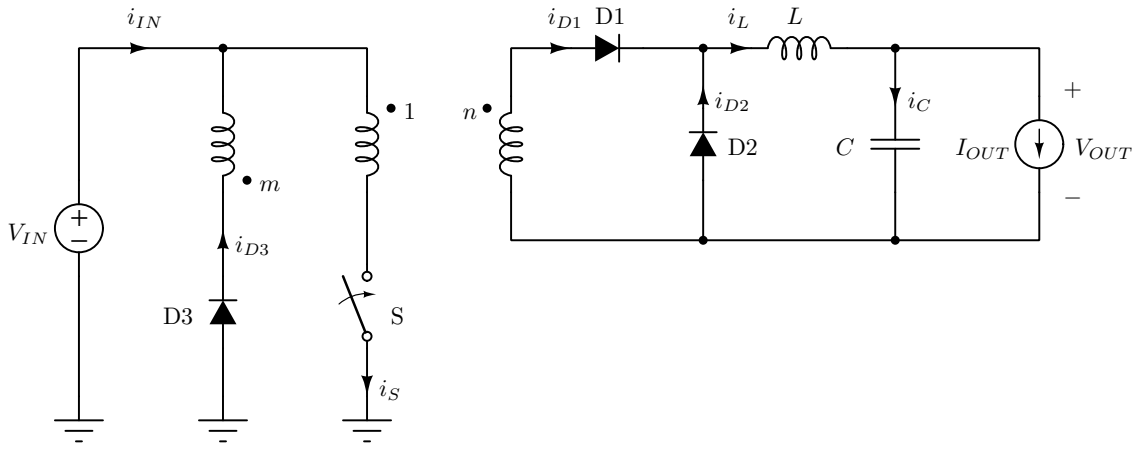
Poslednji korak u izvođenju forward konvertora je uklanjanje pretpostavke da je idealni transformator u kolu sa slike 6 prenosnog odnosa 1 : 1 : 1. Uvođenjem prenosnih odnosa 1 : n : m moguće je prilagoditi naponske nivoe na namotajima potrebama i raspoloživim komponentama i time optimizovati konvertor.

Dobijeni forward konvertor je složenije konstrukcije od flyback konvertora. Dodatna složenost je pre svega u zahtevana dva jezgra, za transformator i za kalem, zatim u složenijem motanju transformatora, kao i u većem broju dioda. Da bi konvertor našao primenu u praksi, on dodatnu složenost mora da opravda nekim drugim korisnim svojstvima. U slučaju forward konvertora je to efikasnije korišćenje magnetskih komponenta, pa je pri većim snagama forward konvertor bolji izbor od flyback konvertora.

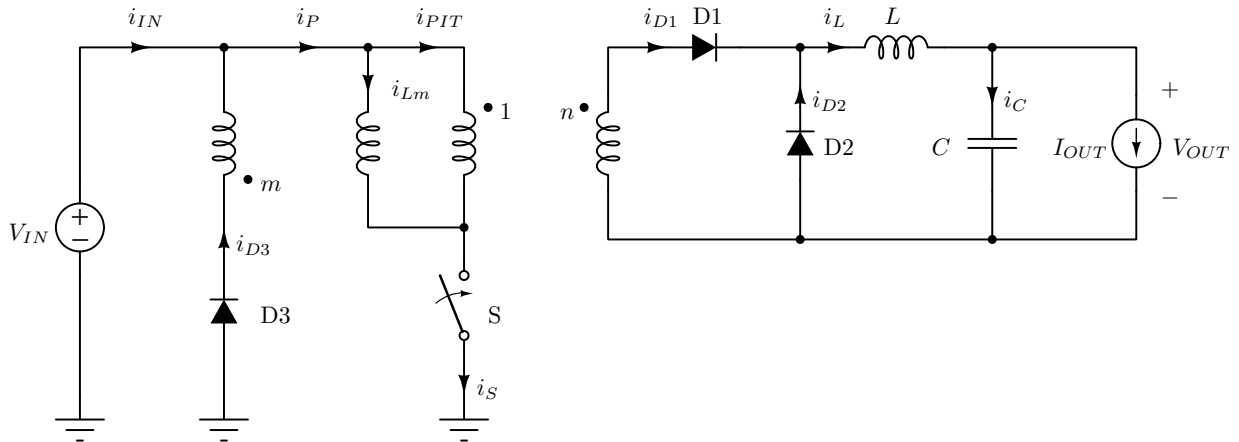
Analiza forward konvertora

Osnovni forward konvertor prikazan je na slici 8. Na šemi sa slike 8 prikazani transformator je podrazumevan kao savršen transformator, pa šema odgovara fizičkom izvođenju konvertora. Za analizu je pogodnija šema prikazana na slici 9, gde je savršen transformator prikazan preko idealnog transformatora i magnetizacione induktivnosti. Sa i_P je označena struja primara transformatora, ona je dostupna i može se meriti. Struja primara idealnog transformatora i_{PT} i struja magnetizacione induktivnosti i_{Lm} su unutrašnje struje modela savršenog transformatora. One fizički ne postoje, u smislu da ne postoje provodnici kroz koje te struje teku, nisu dostupne i ne mogu se meriti. Rasipne induktivnosti su još uvek zanemarene u analizi.

Kolo sa slike 9 koje ćemo analizirati ima četiri prekidačka elementa, što znači da je broj mogućih varijacija stanja prekidačkih elemenata $2^4 = 16$. Kako broj mogućih varijacija eksponencijalno raste sa brojem prekidačkih elemenata, metod analize zasnovan na ispitivanju



Slika 8: Forward konvertor.

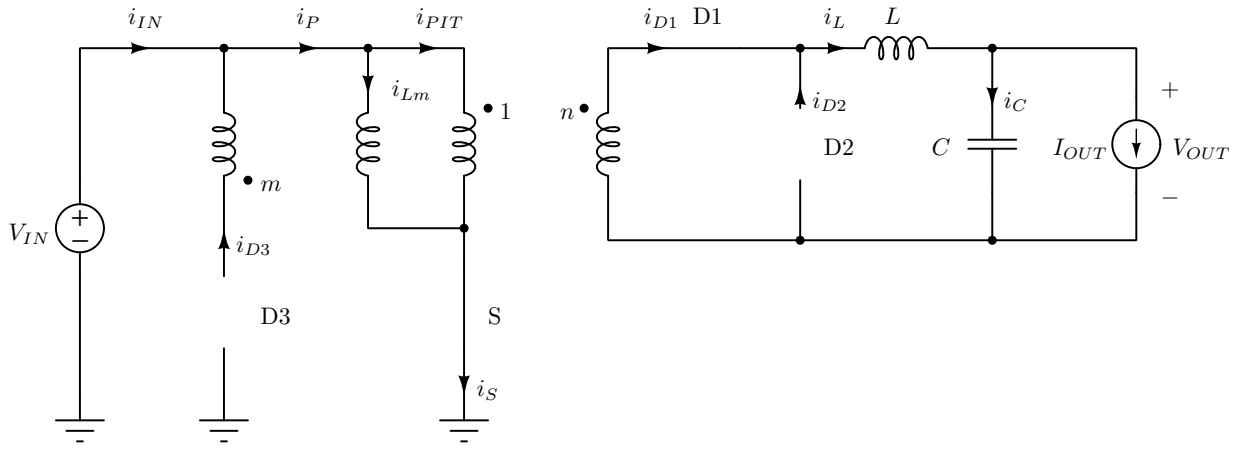


Slika 9: Forward konvertor, izdvojena magnetizaciona induktivnost.

celog kombinatornog prostora postaje neefikasan već kada broj prekidačkih elemenata pređe dva. U cilju smanjenja broja varijacija koje treba razmatrati, pogodno je uočiti da kod transformatora samo jedan namotaj može biti povezan na „čvrst“ napon. Pod pojmom „čvrst napon“ podrazumevamo napon koji malo zavisi od struje, a takve napone obezbeđuju naponski izvori i kondenzatori. Namotaj koji je povezan na čvrst napon definiše napone na svim ostalim namotajima savršenog transformatora.

Kada je prekidač S uključen, napone na svim namotajima transformatora definiše napon V_{IN} koji je prekidačem S doveden na namotaj sa prenosnim brojem 1, koji ćemo smatrati za primar. Napon na sekundaru je $n V_{IN}$, a na pomoćnom namotaju za demagnetizaciju $m V_{IN}$, gde su svi naponi podrazumevano označeni sa pozitivnim krajem na tački koja označava smer motanja namotaja („plus na tački“). Ovakvi naponi, uslovljeni uključenim prekidačem, rezultuju neprovodnim stanjem dioda $D1$ i $D3$, pošto su na njima primenjeni naponi inverzne polarizacije, dok dioda $D2$ provodi struju kalema i_L . U analizi će biti pretpostavljeno da je struja potrošača dovoljno velika da je struja kalema stalno pozitivna, $i_L > 0$. Ovo odgovara kontinualnom režimu rada konvertora (continuous conduction mode, CCM).

Za svaku varijaciju stanja prekidača, kolu sa slike 9 odgovara ekvivalentno kolo u kome su prekidački elementi zamenjeni odgovarajućim ekvivalentima, otvorenom vezom ako je prekidački element isključen ili kratkom vezom ako je prekidački element uključen. Za stanje uslovljeno uključenim prekidačem i $i_L > 0$, provodni su prekidač S i dioda $D1$, dok su neprovodne diode $D2$ i $D3$. Ekvivalentno kolo za takvu varijaciju stanja prekidačkih elemenata prikazano je na slici 10 i ono predstavlja konvertor u intervalu vremena $0 \leq t < D T_S$, gde je D upravljачka promenljiva.



Slika 10: Ekvivalentno kolo forward konvertora u stanju kada provodi prekidač.

Kada je formirano ekvivalentno kolo konvertora za specificiranu varijaciju stanja prekidačkih elemenata, konvertor je sveden na linearno kolo koje je uvek moguće rešiti. U tabeli 1 su dati izrazi koji za odgovarajuću varijaciju stanja prekidačkih elemenata u funkciji ulaznog napona, izlazne struje i promenljivih stanja (struje kalemova i naponi kondenzatora) daju tri grupe napona i struja u kolu: kopromenljive stanja (naponi kalemova i struje kondenzatora), napone na prekidačkim elementima i struje prekidačkih elemenata. Prva grupa je sa stanovišta modela stanja električnog kola bitna za formiranje jednačina stanja, zamenom karakteristika reaktivnih elemenata u ove jednačine dobijaju se jednačine stanja. Druge dve grupe jednačina su jednačine izlaza u modelu stanja električnog kola, a promenljive koje obuhvataju su bitne za dimenzionisanje prekidačkih elemenata.

Vremenski dijagrami relevantnih struja i napona u forward konvertoru sa slike 9 su dati na slici 11 i oni prate jednačine iz tabele 1. Numeričke vrednosti, odnosno izrazi koji ih određuju, nisu još uvek poznati za sve parametre na dijagramima sa slike 11, na primer još uvek nisu poznate vrednosti V_{OUT} , I_0 i I_1 . Ove vrednosti će upravo i biti određene analizom dijagrama sa slike 11, koji su za sada kvalitativni.

Druga relevantna varijacija stanja prekidačkih elemenata nastaje odmah po isključenju prekidača S. Provođenje struje kalema preuzima dioda D2, dok provođenje struje magnetizacione induktivnosti preko idealnog transformatora preuzima dioda D3. Dioda D1 je neprovodna, inverzno polarizovana naponom $\frac{n}{m} V_{IN}$, kako je dato u tabeli 1. Ovakvo stanje u kolu se održava u intervalu vremena $D T_S \leq t < (D + D_2) T_S$, za $i_{D3} > 0$, dok se ne izvrši potpuna demagnetizacija jezgra koju karakteriše $i_{Lm} = 0$. Kako je $i_{Lm}(0) = 0$, trajanje demagnetizacionog intervala $D_2 T_S$ se može odrediti koristeći argument fluksa (volt-second balance) primenjen na magnetizacionu induktivnost. Vrednosti v_{Lm} su date u tabeli 1, pa je

$$V_{IN} D - \frac{1}{m} V_{IN} D_2 = 0 \quad (1)$$

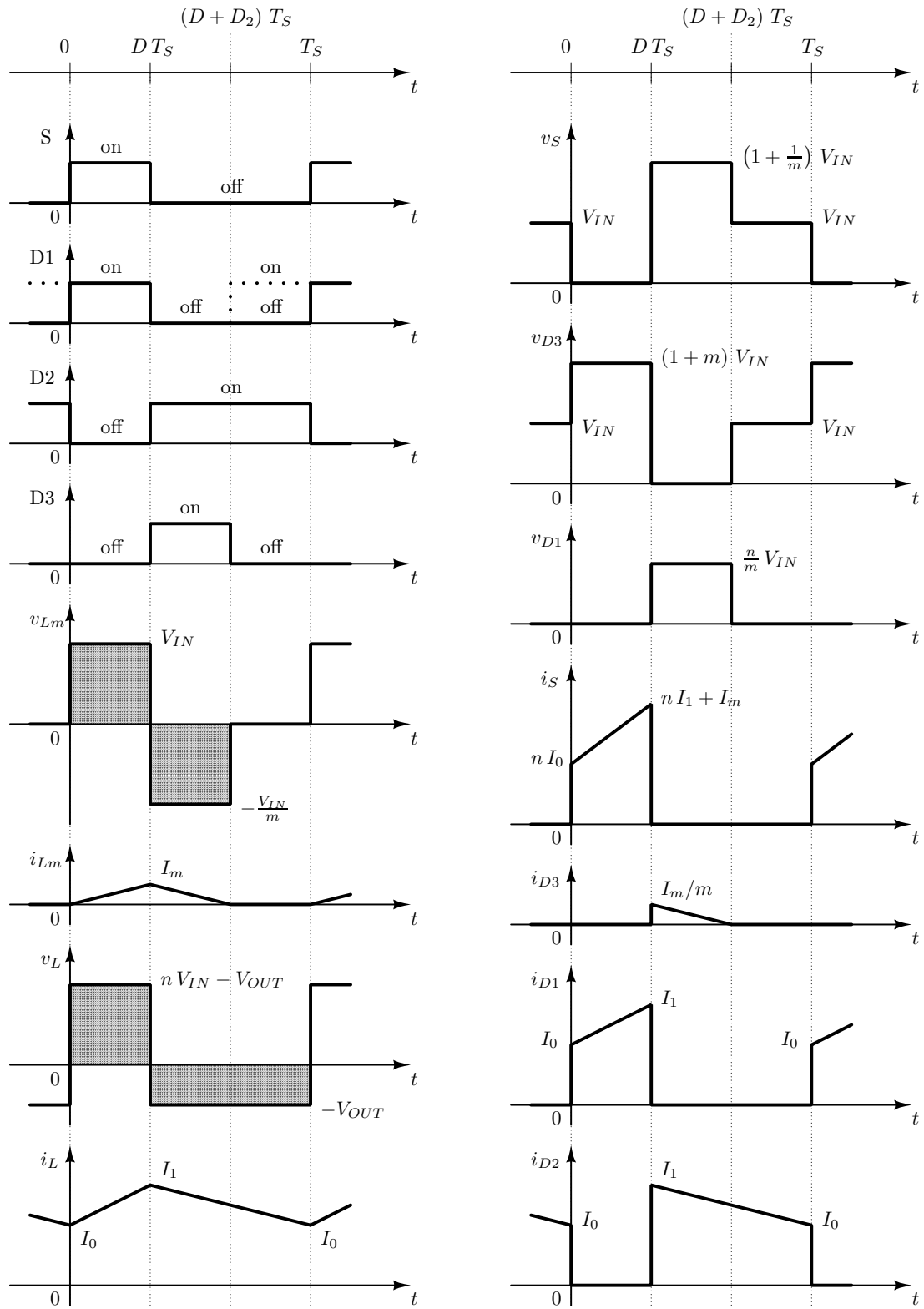
odakle je normalizovano trajanje demagnetizacionog intervala

$$D_2 = m D. \quad (2)$$

Kako je u svakoj periodi prekidanja potrebno izvršiti potpunu demagnetizaciju jezgra, mora da važi $(D + D_2) T_S < T_S$, odnosno $D + D_2 < 1$, odakle je

$$D < \frac{1}{1 + m}. \quad (3)$$

Ovo predstavlja dodatno ograničenje na opseg raspoloživih vrednosti za D . Sa tačke gledišta uklanjanja ograničenja, povoljno bi bilo izabrati vrednost $m \rightarrow 0$, ali bi to dovelo



Slika 11: Naponi i struje u forward konvertoru.

Tabela 1: Naponi i struje u forward konvertoru

t	$0 \leq t < D T_S$	$D T_S \leq t < (D + D_2) T_S$	$(D + D_2) T_S \leq t < T_S$
$\frac{\Delta t}{T_S}$	D	D_2	$1 - D - D_2$
on	S, D1	D2, D3	(D1?), D2
off	D2, D3	S, D1	S, (D1?), D3
v_{Lm}	V_{IN}	$-\frac{1}{m} V_{IN}$	0
v_L	$n V_{IN} - V_{OUT}$	$-V_{OUT}$	$-V_{OUT}$
i_C	$i_L - I_{OUT}$	$i_L - I_{OUT}$	$i_L - I_{OUT}$
v_S	0	$(1 + \frac{1}{m}) V_{IN}$	V_{IN}
v_{D1}	0	$\frac{n}{m} V_{IN}$	0
v_{D2}	$n V_{IN}$	0	0
v_{D3}	$(1 + m) V_{IN}$	0	V_{IN}
i_S	$n i_L + i_{Lm}$	0	0
i_{D1}	i_L	0	0
i_{D2}	0	i_L	i_L
i_{D3}	0	$\frac{1}{m} i_{Lm}$	0

do beskonačnog napona na magnetizacionoj induktivnosti, prekidaču S i diodi D1 tokom beskonačno kratkog intervala demagnetizacije (2), kao i do beskonačne struje kroz diodu D3, o čemu svedoče izrazi dati u tabeli 1. Stoga, izbor za m je uslovljen kompromisom između trajanja demagnetizacionog intervala i vršnih vrednosti navedenih napona i struja, u skladu sa raspoloživim komponentama.

Vršna vrednost struje magnetizacije je

$$I_m = \frac{V_{IN}}{L_m} D T_S \quad (4)$$

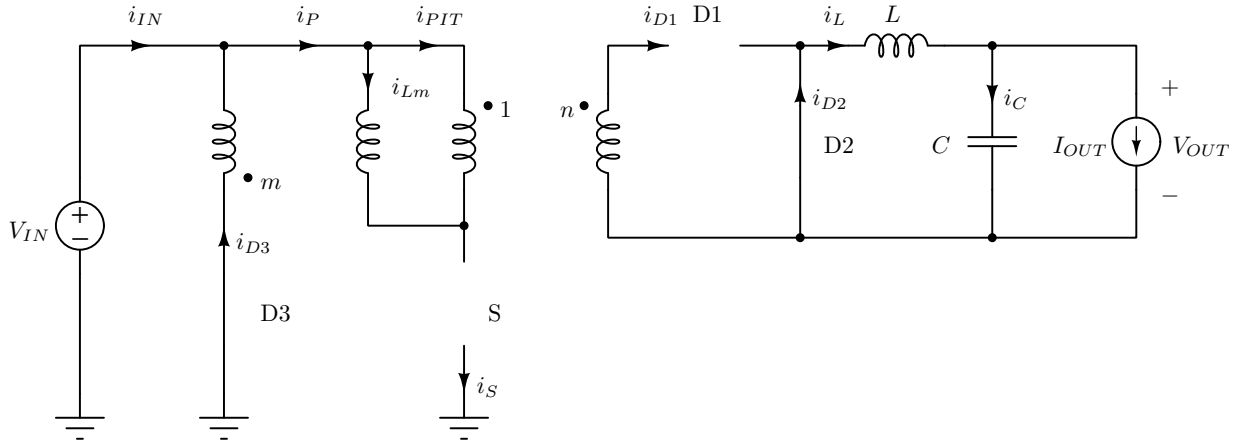
i obično ova struja nije velika, pre svega zbog velike vrednosti L_m , koja je obično mnogo veća od induktivnosti L , tipično dva reda veličine. Svedjedno, jezgro je neophodno potpuno razmagnetisati u svakoj periodi prekidanja, inače bi struja magnetizacije kontinualno rasla sve do ulaska jezgra u zasićenje i destrukcije konvertora, najverovatnije kroz pregorevanje prekidača usled prevelike trenutne vrednosti struje.

Tokom intervala vremena $0 \leq t < D T_S$ magnetizaciona induktivnost se puni energijom, dok se u intervalu $D T_S \leq t < (D + D_2) T_S$ energija akumulisana u magnetizacionoj induktivnosti prazni. Magnetizaciona induktivnost energiju razmenjuje samo sa izvorom V_{IN} . Snagu koju magnetizaciona induktivnost razmenjuje sa V_{IN} karakteriše struja $i_{Lm} - i_{D3}$ i njen vremenski dijagram je prikazan na slici 13. Snaga koju jezgro transformatora razmenjuje sa izvorom je $p_{Lm} = V_{IN} (i_{Lm} - i_{D3})$. Srednja vrednost struje $i_{Lm} - i_{D3}$ je

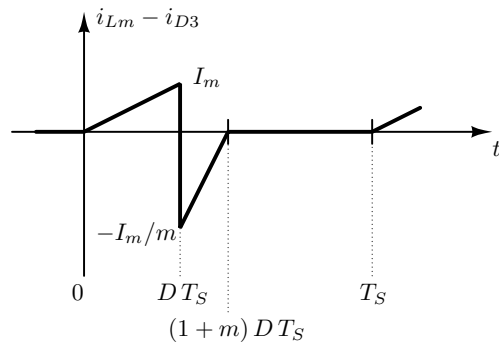
$$\frac{1}{T_S} \left(\frac{1}{2} D T_S I_m - \frac{1}{2} m D T_S \frac{I_m}{m} \right) = 0 \quad (5)$$

što, očekivano, odgovara srednjoj snazi magnetizacione induktivnosti koja je jednaka nuli. U jednom delu periode jedan deo snage izvora se troši na magnećenje jezgra, dok se u drugom delu periode sva ta energija vraća izvoru.

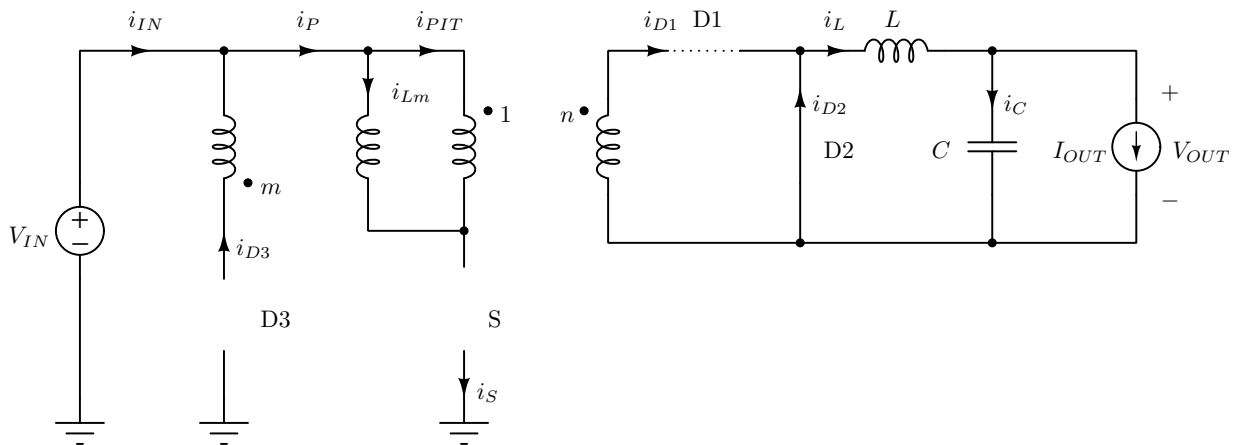
Nakon izvršene demagnetizacije jezgra transformatora, pod pretpostavkom da je struja potrošača dovoljno velika da je uvek $i_L > 0$, do kraja periode nastavlja da vodi dioda



Slika 12: Ekvivalentno kolo forward konvertora u stanju kada provode diode D2 i D3.



Slika 13: Komponenta ulazne struje uslovljena magnetizacijom i demagnetizacijom jezgra, slučaj $m = \frac{1}{2}$.



Slika 14: Ekvivalentno kolo forward konvertora u stanju kada provodi dioda D2.

D2. Ogovarajući relevantni naponi i struje u konvertoru su dati u tabeli 1, a odgovarajuća ekvivalentna šema na slici 14. Na osnovu napona na kalemu, primenom argumenta fluksa (volt-second balance) dobija se

$$D (n V_{IN} - V_{OUT}) - D' V_{OUT} = 0 \quad (6)$$

odakle se za izlazni napon dobija

$$V_{OUT} = n D V_{IN} \quad (7)$$

koji u kontinualnom režimu rada konvertora ne zavisi od struje potrošača.

Na ovom mestu treba ponovo razmotriti provođenje diode D1 u intervalu vremena kada je prekidač isključen, a demagnetizacija jezgra završena. Vremenski dijagrami sa slike 11 ukazuju da je napon na diodi nula, ali i da je struja diode nula. Zašto ne dolazi do deljenja struje kalema na diode D1 i D2? Ako su diode idealne, to nije moguće jer ne bi bilo moguće zadovoljiti amper navojak balans na idealnom transformatoru, što zbog diode D3 koja ne dopušta protok struje u potrebnom smeru, što zbog struje magnetizacije induktivnosti koja je jednaka nuli, uz napon na magnetizacionoj induktivnosti koji bi u slušaju provođenja diode bio jednak nuli, pa bi se struja magnetizacije induktivnosti održavala na nuli. Dakle, u slučaju idealnih dioda situacija je jasna, dioda D1 se nalazi na rubu provođenja, inverzni napon joj je jednak nuli, ali joj je i struja jednaka nuli. Stoga, priloženi dijagrami na slici 11 su validni u slučaju pretpostavljenih idealnih dioda.

Razmatrani slučaj budi sumnju u validnost zaključaka u slučaju da diode nisu idealne, kao što i nisu. Energetske diode, pri usaglašenim referentnim smerovima struje i napona, imaju monotono rastuću naponsko strujnu karakteristiku. Deo kola od značaja za razmatranje provođenja diode D1 je prikazan na slici 15. Ako dioda D2 vodi, napon direktne polarizacije na njoj, v_{D2} označen na slici 15, je pozitivan. Ako dioda D1 ne vodi njen napon je nula, a ako provodi neku malu struju (struju manju od struje diode D2) njen napon direktne polarizacije v_{D1} je manji od v_{D2} , $v_{D1} < v_{D2}$. To znači da je napon magnetizacije induktivnosti

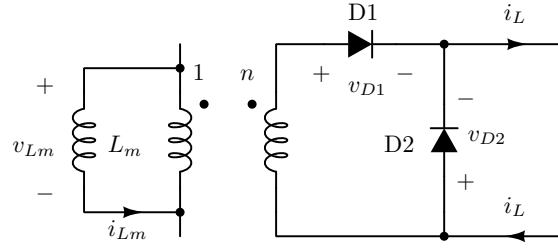
$$v_{Lm} = -\frac{v_{D2} - v_{D1}}{n} \quad (8)$$

neki mali negativan napon i on tokom vremena proizvodi malu negativnu vrednost struje i_{Lm} , koja za rezultat daje pozitivnu struju diode D1 od

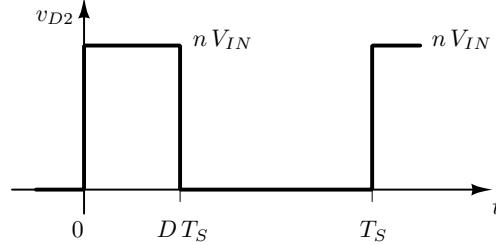
$$i_{D1} = -\frac{1}{n} i_{Lm}. \quad (9)$$

Stoga, dioda D1 provodi, ali malu struju koja vremenom raste. Opisani efekat je mali, ali se može posmatrati i meriti (Dušan Prica, diplomski rad, ETF Beograd, 2007). Dakle, iako se u razmatranju koriste idealizovani modeli dioda, ispravno je smatrati da je dioda D1 u intervalu kada je prekidač isključen i demagnetizacija završena provodna, ali da provodi zanemarivo malu struju. Ova korekcija u dijagramu provođenja diode D1 je na slici 11 označena tačkastom linijom.

Na slici 11 nije nacrtan dijagram napona na ulazu L filtra, jednak naponu inverzne polarizacije diode D2, v_{D2} . Taj dijagram je izdvojen i prikazan na slici 16. Dijagram je isti kao i odgovarajući dijagram kod buck konvertora, sa tim što je umesto V_{IN} vršna vrednost napona $n V_{IN}$. Ovaj zaključak je značajan za generalizaciju rezultata analize buck konvertora na forward konvertor koji je “buck derived”. Na primer, izraz za izlazni napon forward konvertora (7) se u odnosu na izraz za izlazni napon buck konvertora razlikuje samo po tome što u njemu umesto V_{IN} stoji $n V_{IN}$. Ova analogija će posebno biti od koristi u slučaju analize diskontinualnog režima rada konvertora.



Slika 15: Deo forward konvertora značajan za razmatranje provođenja diode D1.



Slika 16: Vremenski dijagram napona v_{D2} .

Za kvantitativno određivanje dijagrama sa slike 11, potrebno je još odrediti vrednosti I_0 i I_1 . Na osnovu napona na kalem, za interval $0 \leq t < DT_S$ struja kalema je data sa

$$i_L(t) = I_0 + \frac{nV_{IN} - V_{OUT}}{L} t \quad (10)$$

dok je za interval $DT_S \leq t < T_S$ struja kalema data sa

$$i_L(t) = I_1 - \frac{V_{OUT}}{L} (t - DT_S) \quad (11)$$

pri čemu je

$$I_1 = i_L(DT_S) = I_0 + \frac{nV_{IN} - V_{OUT}}{L} DT_S. \quad (12)$$

U cilju potpunog određivanja vremenskog dijagrama struje i_L i potvrde da konvertor radi u kontinualnom režimu ($I_0 > 0$), potrebno je još odrediti struju I_0 . Za ovo će biti potrebno povezati struju kalema sa strujom potrošača primenom amper sekund balansa na kondenzatoru.

Kako je bez obzira na varijaciju stanja prekidačkih elemenata, prema tabeli 1, struja kondenzatora data sa

$$i_C = i_L - I_{OUT} \quad (13)$$

tako se usrednjavanjem dobija

$$0 = \overline{i_C} = \overline{i_L} - I_{OUT} \quad (14)$$

pa je

$$\overline{i_L} = I_{OUT}. \quad (15)$$

Sa druge strane, analizom vremenskog dijagrama sa slike 11, srednja vrednost struje kalema je preko površine dva trapeza data sa

$$\overline{i_L} = \frac{1}{T_S} \left(\frac{I_0 + I_1}{2} DT_S + \frac{I_1 + I_0}{2} D'T_S \right) = \frac{I_0 + I_1}{2}. \quad (16)$$

Stoga, I_0 i I_1 se mogu istovremeno odrediti iz sistema linearnih jednačina (12) i (16) koje se algebarskim transformacijama svode na povoljnu formu

$$I_1 + I_0 = 2I_{OUT} \quad (17)$$

i

$$I_1 - I_0 = \frac{n V_{IN} - V_{OUT}}{L} D T_S. \quad (18)$$

Rešenje ovog sistema jednačina je

$$I_0 = I_{OUT} - \frac{n V_{IN} - V_{OUT}}{2 f_S L} D = I_{OUT} - \frac{n V_{IN}}{2 f_S L} D D' \quad (19)$$

i

$$I_1 = I_{OUT} + \frac{n V_{IN} - V_{OUT}}{2 f_S L} D = I_{OUT} + \frac{n V_{IN}}{2 f_S L} D D' \quad (20)$$

čime su u potpunosti određeni svi vremenski dijagrami prikazani na slici 11.

Uslov za rad konvertora u kontinualnom režimu, koji je podrazumevan tokom prethodne analize, je $I_0 > 0$, što garantuje $i_L > 0$. Prema (19), uslov koji struja potrošača treba da ispuni za rad u kontinualnom režimu je

$$I_{OUT} > \frac{n V_{IN}}{2 f_S L} D D' \quad (21)$$

ili

$$I_{OUT} > \frac{V_{OUT}}{2 f_S L} D'. \quad (22)$$

Ovaj uslov ima istu formu kao i odgovarajući uslov za buck konvertor, sa tim što umesto V_{IN} stoji $n V_{IN}$, u skladu sa dijagramom sa slike 16.

Ulazna struja konvertora se primenom Kirhofovog zakona za struje može svesti na $i_{IN} = i_S - i_{D3}$, što su struje date svojim vremenskim dijagramima na slici 11. Srednja vrednost ulazne struje je usrednjavanjem i primenom (15) i (16), uz korišćenje rezultata (5), dobijena kao

$$I_{IN} = \overline{i_{IN}} = \frac{1}{T_S} \frac{n I_0 + n I_1}{2} D T_S = n D I_{OUT} \quad (23)$$

pa je ulazna snaga konvertora

$$P_{IN} = V_{IN} I_{IN} = V_{IN} n D I_{OUT}. \quad (24)$$

Izlazna snaga konvrtora je $P_{OUT} = V_{OUT} I_{OUT}$, što se zamenom (7) dobija kao

$$P_{OUT} = n D V_{IN} I_{OUT}. \quad (25)$$

Očekivano, $P_{OUT} = P_{IN}$ i konvertor ima koeficijent korisnog dejstva $\eta = 100\%$.

Imajući u vidu izraze za izlazni napon (7) i ulaznu struju (23) forward konvertora, za kontinualni režim i ustaljeno stanje on se može modelovati idealnim transformatorom prenosnog odnosa $1 : n D$, potpuno analogno odgovarajućem modelu buck konvertora.

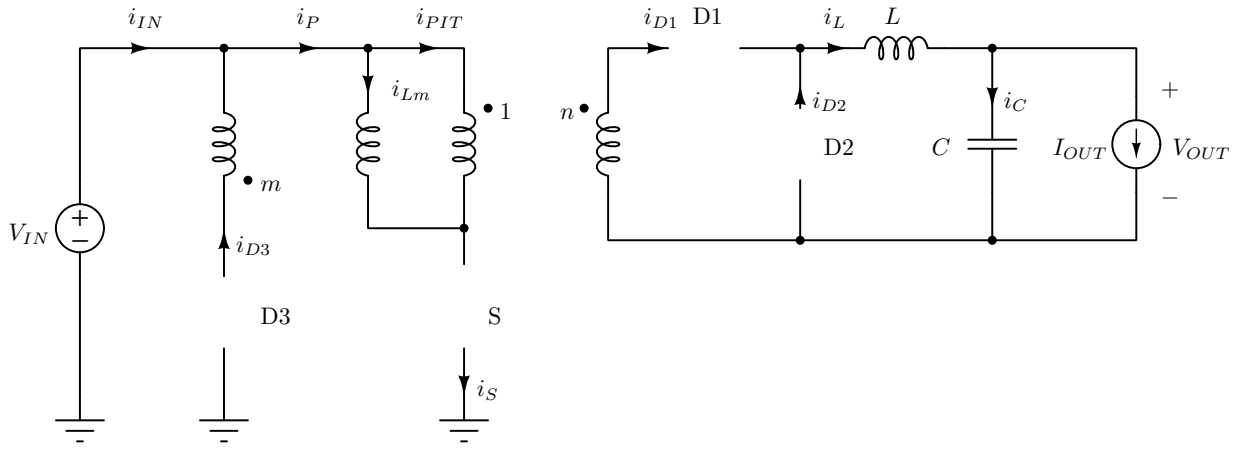
Osvrt na diskontinualni režim rada

Po analogiji sa buck konvertorom, na potpuno isti način će forward konvertor u slučaju da uslov (21) nije ispunjen raditi u diskontinualnom režimu. Kada se zadovolji volt sekund balans na kalemu

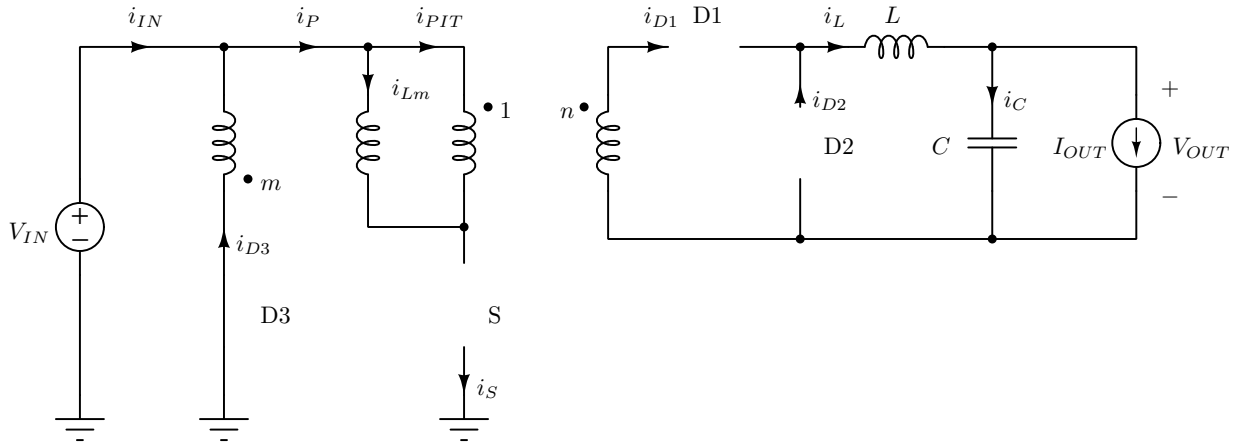
$$D T_S (n V_{IN} - V_{OUT}) - D_3 T_S V_{OUT} = 0 \quad (26)$$

u trenutku $(D + D_3) T_S$ će dioda D2 prestati da vodi. Iz (26) se normalizovano trajanje provođenja diode D2 dobija kao

$$D_3 = \frac{n V_{IN} - V_{OUT}}{V_{OUT}} D. \quad (27)$$



Slika 17: Ekvivalentno kolo forward konvertora u stanju kada ne provodi ni jedan prekidački element.



Slika 18: Ekvivalentno kolo forward konvertora u stanju kada provodi samo demagnetizacijska dioda.

U slučaju da (21) važi, biće i $D + D_3 < 1$. Ako je $D + D_3 > D + D_2$, konvertor će preći u stanje prikazano na slici 17, a ako je $D + D_3 < D + D_2$, konvertor će preći u stanje prikazano na slici 18. Procesi pražnjenja kalema L i magnetizacije induktivnosti L_m nisu međusobno korelisani, pošto na trajanje pražnjenja kalema utiče izlazna struja, koja je njegova srednja vrednost. Struja magnetizacije induktivnosti uslovljena je trajanjem intervala tokom koga je prekidač bio uključen (4), kada se magnetizacijska induktivnost punila, odnosno kada je jezgro transformatora akumuliralo energiju. Magnetizacijska induktivnost transformatora mora da radi u diskontinualnom režimu toka struje kako jezgro ne bi otišlo u zasićenje. Kod kalema L to nije slučaj, on može, a ne mora, da ima diskontinualan tok struje. Ako konvertor radi u diskontinualnom režimu, a pod tim se podrazumeva diskontinualan tok struje kalema L , stanje sa slike 17 nastupa sigurno, dok stanje sa slike 18 može nastupiti, a ne mora, što zavisi od izlazne struje. Očigledno, broj slučajeva za koje bi mogli biti crtani vremenski dijagrami struja i napona konvertora raste, pa bi bilo preobimno i nepotrebno pokriti sve mogućnosti. Metodi analize su već detaljno razrađeni i direktno se mogu primeniti na svaki od mogućih slučajeva.

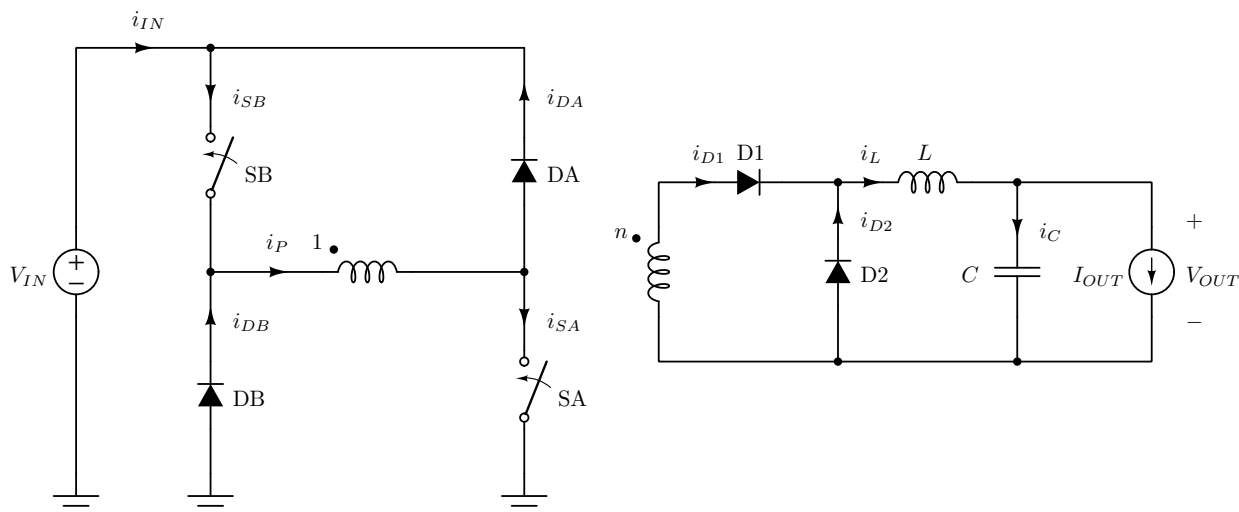
Zavisnost izlazne struje konvertora u diskontinualnom režimu rada od V_{IN} , D , L , f_s i I_{OUT} se izvodi na isti način kao i u slučaju buck konvertora, uz jedinu razliku što je napon primenjen na ulazu L filtra kada prekidač vodi jednak $n V_{IN}$ kod forward konvertora, u odnosu na V_{IN} kod buck konvertora. Naglašavanje ove činjenice i njeno korišćenje za analizu diskontinualnog režima je i bio cilj izdvajanja vremenskog dijagrama napona v_{D2} na slici 16.

Forward konvertor sa dva prekidača

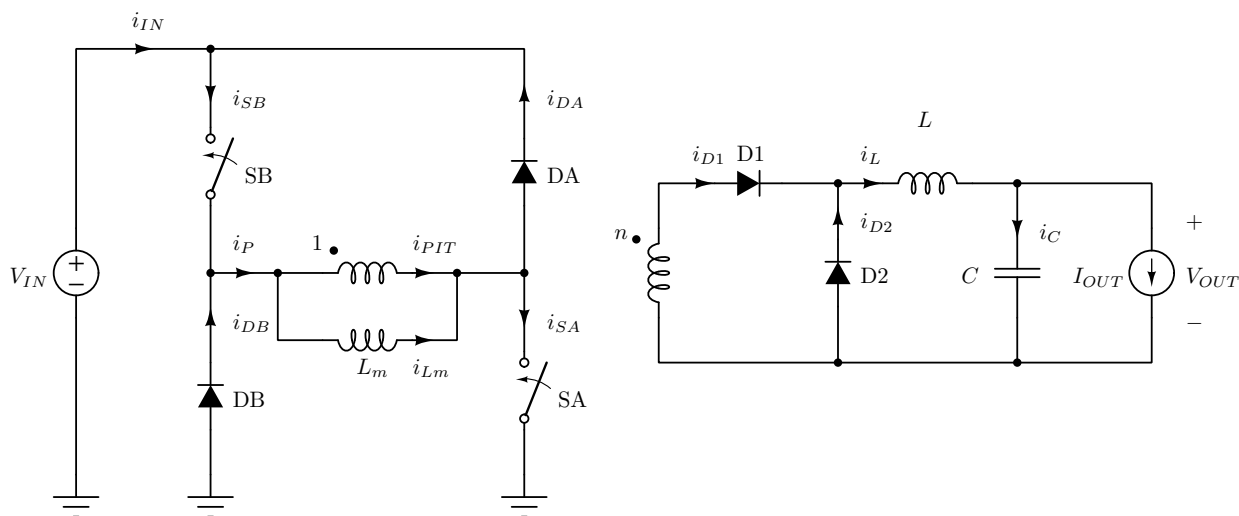
U dosadašnjoj analizi forward konvertora nije razmatrano rasipanje transformatora koje svakako postoji. Pošto je prekidač vezan direktno na namotaj transformatora, alternative za protok struje rasipne induktivnosti prilikom isključenja prekidača nema, pa je ugradnja snabera potrebna. Snaberi su razmatrani kod flyback konvertora i potpuno isti metodi zaštite prekidača se mogu generalizovati i na forward konvertor.

Osim zahteva za snabderom, forward konvertor ima još dva nedostatka: prenapon na prekidaču (napon veći od ulaznog napona) dok se vrši demagnetizacija jezgra i složen transformator koji ima tri namotaja. Svi ovi nedostaci se mogu otkloniti po cenu dodavanja još jednog prekidača koji zahteva high side driver i još jedne diode. Šema forward konvertora sa dva prekidača je prikazana na slici 19. Podrazumevajući da je primenjeni transformator savršen, zamenom transformatora ekvivalentnom šemom koja se sastoji iz magnetizacione induktivnosti i idealnog transformatora dobija se kolo sa slike 20. Ovo kolo sadrži 6 prekidačkih elemenata, što daje $2^6 = 64$ moguće varijacije stanja prekidačkih elemenata. Ispitivanje celog kombinatornog prostora stoga ne može biti efikasno.

Talasni oblici koji odgovaraju radu forward konvertora sa dva prekidača u kontinualnom režimu prikazani su na slici 21. Prekidači SA i SB su istovremeno ili uključeni ili isključeni.



Slika 19: Forward konvertor sa dva prekidača.



Slika 20: Forward konvertor sa dva prekidača, izdvojena magnetizaciona induktivnost.

Tabela 2: Naponi i struje u forward konvertoru sa dva prekidača

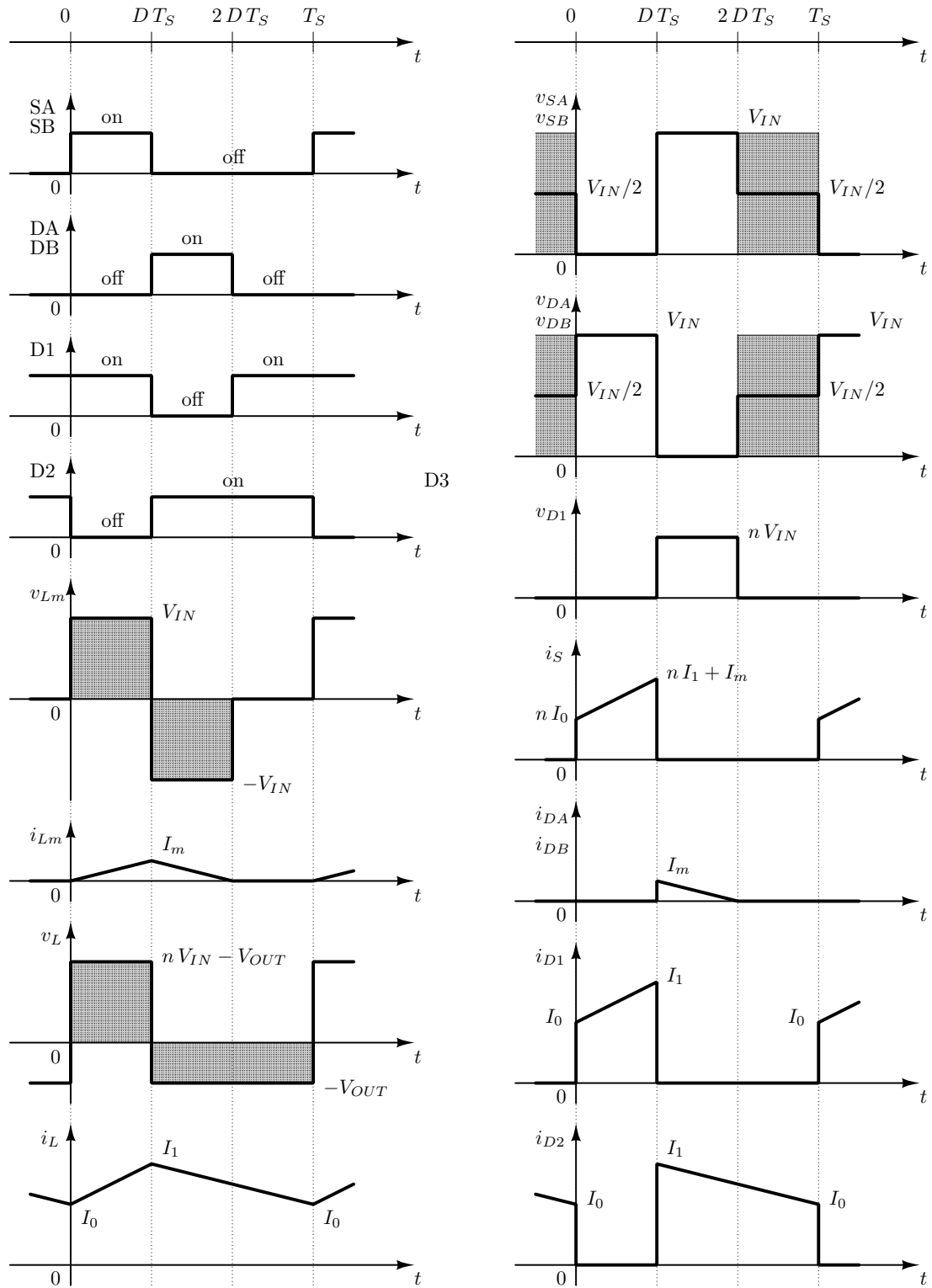
t	$0 \leq t < DT_S$	$DT_S \leq t < 2DT_S$	$2DT_S \leq t < T_S$
$\frac{\Delta t}{T_S}$	D	D	$1 - 2D$
v_{Lm}	V_{IN}	$-V_{IN}$	0
v_L	$nV_{IN} - V_{OUT}$	$-V_{OUT}$	$-V_{OUT}$
i_C	$i_L - I_{OUT}$	$i_L - I_{OUT}$	$i_L - I_{OUT}$
v_{SA}	0	V_{IN}	? ($0 \leq v_{SA} \leq V_{IN}$)
v_{SB}	0	V_{IN}	$v_{DA} = V_{IN} - v_{SA}$
v_{DA}	V_{IN}	0	$v_{SB} = V_{IN} - v_{SA}$
v_{DB}	V_{IN}	0	v_{SA}
v_{D1}	0	nV_{IN}	0
v_{D2}	nV_{IN}	0	0
$i_{SA} = i_{SB}$	$ni_L + i_{Lm}$	0	0
$i_{DA} = i_{DB}$	0	i_{Lm}	0
i_{D1}	i_L	0	0
i_{D2}	0	i_L	i_L

Ovo ograničenje broj teorijski mogućih varijacija stanja prekidačkih elemenata smanjuje sa 64 na 32. Kada su prekidači uključeni, diode DA i DB su inverzno polarisane ulaznim naponom V_{IN} , što dodatno redukuje kombinatorni prostor. Pošto je pretpostavljeno da konvertor radi u kontinualnom režimu, bar jedna od dioda D1 i D2 mora da vodi. Kako je napon na transformatoru definisan uključenim prekidačima SA i SB, napon na sekundaru daje inverzni napon na diodi D2, isti kao i u slučaju forward konvertora sa jednim prekidačem, koji je prikazan na slici 16. Stoga, u intervalu vremena $0 \leq t < DT_S$ uključeni su prekidači SA i SB i dioda D1, dok su neprovodne diode DA, DB i D2. Ekvivalentno linearno kolo koje odgovara ovoj varijaciji stanja prekidača je prikazano na slici 22. Rešavanjem kola sa slike 22 dobijene su relevantne struje i naponi kako je dato u tabeli 2.

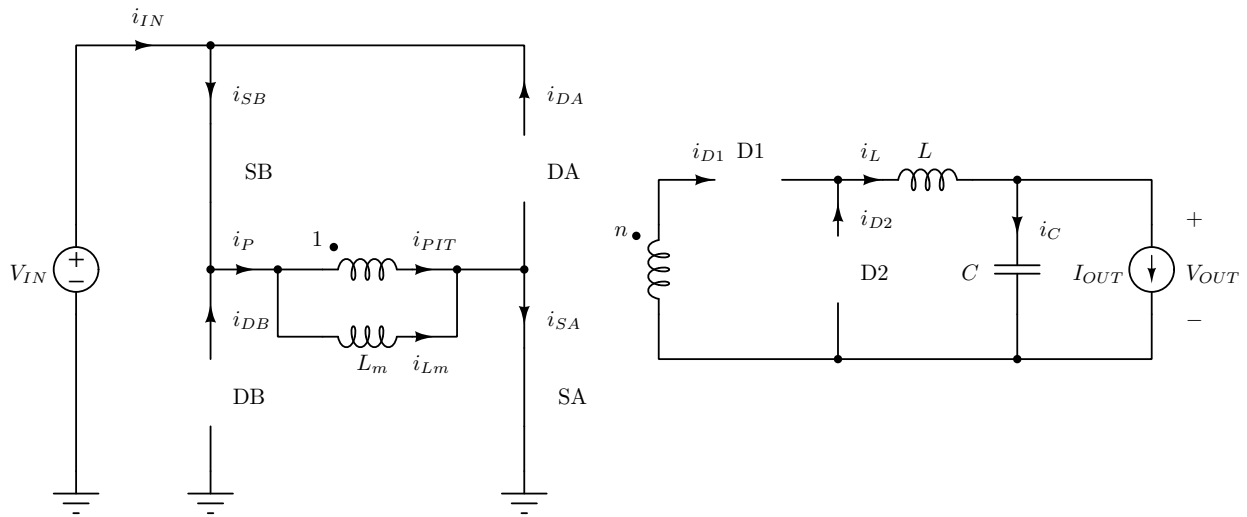
U trenutku DT_S prekidači SA i SB se isključuju. Promena stanja prekidača za posledicu ima i promenu stanja dioda, pošto je potrebno da se obezbedi protok struje magnetizacione induktivnosti L_m i protok struje kalema L . Jedina opcija za protok struje magnetizacione induktivnosti je provođenje dioda DA i DB i one će biti provodne dok se demagnetizacija jezgra ne završi. Ekvivalentna šema za slučaj kada su prekidači SA i SB isključeni, a diode DA i DB vode je prikazana na slici 23. Provođenje dioda DA i DB dovodi napon $-V_{IN}$ na magnetizacionu induktivnost, koji ima istu apsolutnu vrednost kao i tokom intervala dok su prekidači bili uključeni, ali suprotan znak. To znači da će trajanje demagnetizacije jezgra biti jednako trajanju magnetizacije jezgra, DT_S . Stoga, interval vremena tokom koga provode diode DA i DB je $DT_S \leq t < 2DT_S$. Kako demagnetizacija jezgra treba da se izvrši tokom svake periode prekidanja, mora da bude $2DT_S < T_S$, odakle je ograničenje koje se nameće za D

$$D < \frac{1}{2}. \quad (28)$$

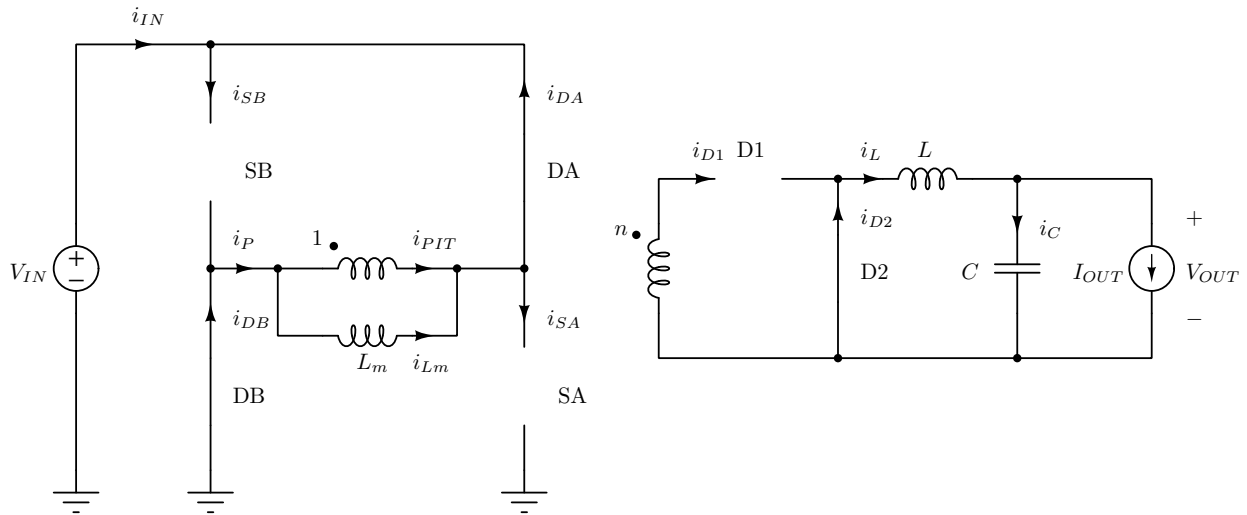
Osim demagnetizacije jezgra, diode DA i DB ograničavaju napon na prekidačima SA i SB na V_{IN} , pa vrše i ulogu snabera. Stoga, dodavanje i podešavanje snabera ovom slučaju nije potrebno. Sva energija rasipne induktivnosti se vraća u izvor V_{IN} , što uvećava koeficijent korisnog dejstva konvertora i smanjuje njegovo zagrevanje. Upravo ovo je razlog što autor



Slika 21: Naponi i struje u forward konvertoru sa dva prekidača.



Slika 22: Forward konvertor sa dva prekidača, ekvivalentna šema kada su uključeni prekidači.

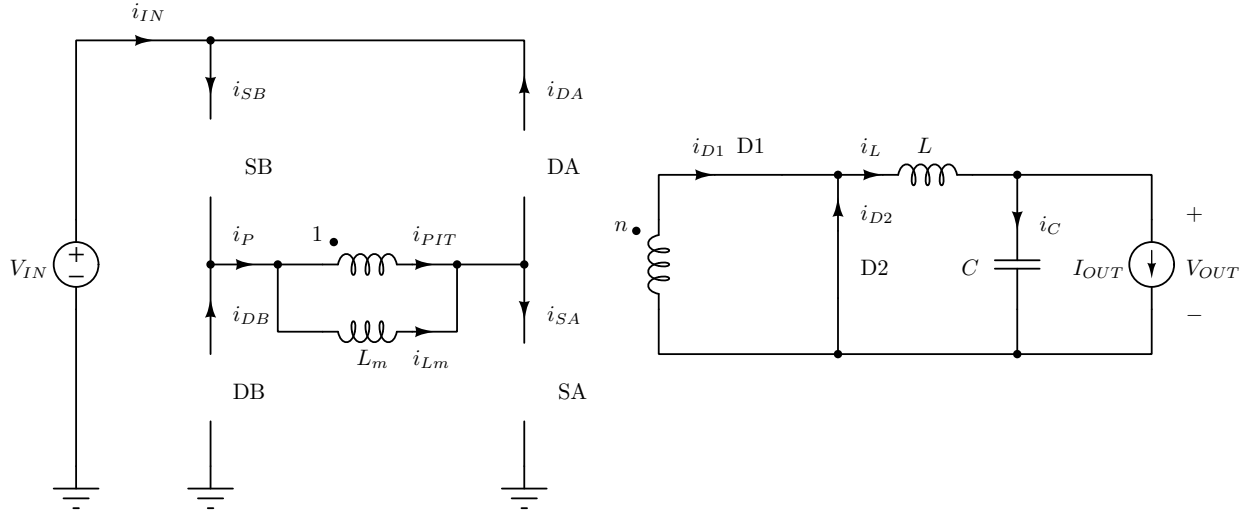


Slika 23: Forward konvertor sa dva prekidača, ekvivalentna šema kada su prekidači isključeni i vrši se demagnetizacija jezgra.

ovog teksta jako voli forward i flyback konvertore sa dva prekidača i rado ih primenjuje u praksi. Projektovanje je brzo i lako, nema brige oko rasipnih induktivnosti i snabera, koeficijent korisnog dejstva je dobar, bolji nego u slučaju da u kolu postoji snaber, nema prenapona na prekidačima ni brige oko naponskog proboja, što zbog prenapona, što zbog spajka izazvanog rasipnom induktivnošću.

Promena polariteta na primaru transformatora je dovela i do promene provođenja dioda na sekundarnoj strani. Dioda D1 više ne vodi, inverzno je polarisana naponom $n V_{IN}$, dok struju kalema preuzima dioda D2 koja vodi. Pod pretpostavkom kontinualnog režima rada konvertora, dioda D2 će voditi do kraja periode prekidanja. Tokom intervala vremena dok se magnetizaciona induktivnost prazni, dioda D1 će biti inverzno polarisana naponom $n V_{IN}$ i jasno neprovodna.

Po završetku demagnetizacije jezgra, na primarnoj strani transformatora ne vodi ni jedan od prekidačkih elemenata SA, SB, DA, DB. U skladu sa razmatranjem slučaja forward konvertora sa jednim prekidačem, koje je podržano slikom 15, i u slučaju forward konvertora sa dva prekidača dioda D1 će biti provodna, ali na samom rubu provođenja, kako je prikazano na ekvivalentnoj šemi sa slike 24 i kako je dato u tabeli 2. Ovo uslovljava $v_{Lm} = 0$ i kao posledicu $v_{SA} = v_{DB}$ i $v_{SB} = v_{DA}$. Treba uočiti i to da se sada graf kola raspao na tri disjunktne



Slika 24: Forward konvertor sa dva prekidača, ekvivalentna šema kada su prekidači isključeni i završena je demagnetizacija jezgra.

subgrafa, pa jednoznačnog rešenja ne samo da nema, već postoje dva stepena slobode koji vode do jednoznačnog rešenja kola.

Razmotrimo sada detaljnije slučaj kada nijedan prekidački element na primarnoj strani kola sa slike 20 nije provodan, a obe diode na sekundarnoj strani (D1 i D2) jesu provodne. Tada je $v_{Lm} = 0$. Jednačine po Kirchofovom zakonu za napone koje povezuju napone na primarnoj strani kola su

$$v_{SA} + v_{DA} = V_{IN} \quad (29)$$

$$v_{SB} + v_{DB} = V_{IN} \quad (30)$$

$$v_{SA} - v_{DB} = 0 \quad (31)$$

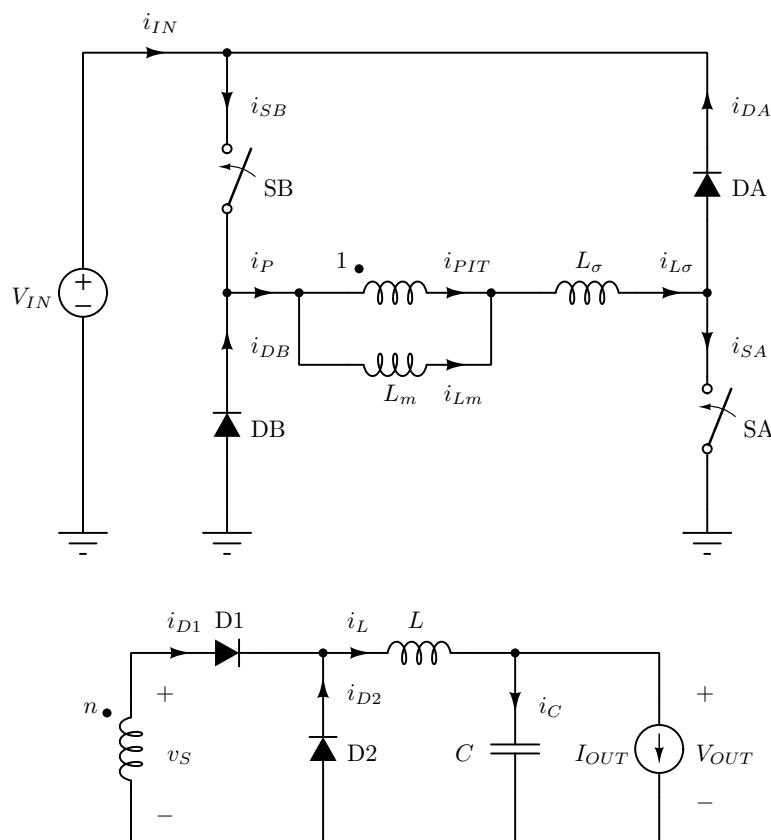
i

$$v_{SB} - v_{DA} = 0. \quad (32)$$

Ovo je linearan sistem jednačina od 4 jednačine sa 4 nepoznate: v_{SA} , v_{SB} , v_{DA} i v_{DB} . U matričnoj formi taj sistem jednačina se može napisati kao

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{SA} \\ v_{SB} \\ v_{DA} \\ v_{DB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{IN} \\ V_{IN} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (33)$$

Sistem jednačina (33) ima rang sistemske matrice 3, što je za 1 manje od punog ranga ("rank deficient by one"). To znači da postoji jedan stepen slobode, odnosno jedna promenljiva kojoj je moguće proizvoljno izabrati vrednost, tako da sistem dobije jednoznačno rešenje. U tabeli 2 za tu promenljivu je izabran napon v_{SA} . Nelinearna ograničenja nameću opseg za v_{SA} i to $v_{SA} \geq 0$, što je uslovljeno provođenjem diode DB i $v_{SA} \leq V_{IN}$, što je uslovljeno provođenjem diode DA. Ovo ograničenje kao posledicu ograničava sve nepoznate napone dioda i prekidača na opseg od 0 do V_{IN} . U vremenskim dijagramima sa slike 21 opseg mogućih napona razmatranih prekidačkih elemenata je označen šrafiranim pravougaonicima, dok je za jednoznačnu vrednost v_{SA} izabrano $\frac{1}{2} V_{IN}$, što se često „opravdava“ pomoću ni na čemu zasnovanog „argumenta simetrije“. Iko ko je ikada napravio konvertor sa slike 19 i pogledao napone prekidačkih elemenata na primarnoj strani zna da su razmatrani naponi zavisni od vrednosti parazitnih elemenata, kao i od sonde



Slika 25: Forward konvertor sa dva prekidača, izdvojene magnetizaciona i rasipna induktivnost.

i osciloskopa kojim se posmatranje vrši. Za praksu to je irelevantno, važno je samo da su naponi prekidačkih elemenata ograničeni na ospeg od 0 do V_{IN} , pa je stoga moguće izabrati odgovarajuće prekidačke elemente bez straha od naponskog proboja.

Pojava i analiza diskontinualnog režima rada kod forward konvertora sa dva prekidača je ista kao i kod forward konvertora sa jednim prekidačem, pošto su oni na sekundarnoj strani identični. Razlika je samo na primarnoj strani, u načinu kako se pravi napon sekunda transformatora i demagnetizuje jezgro.

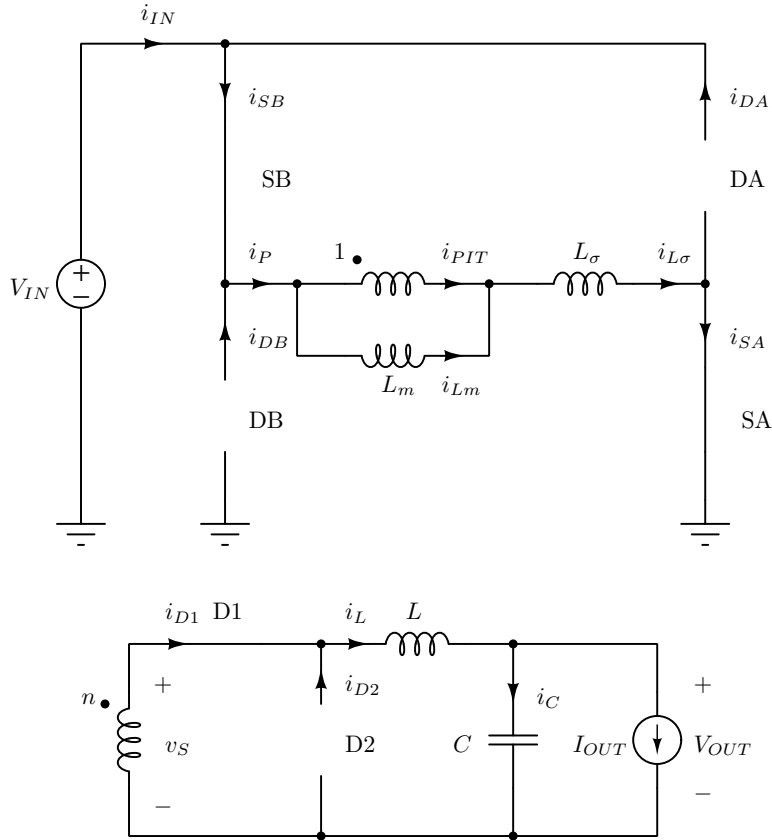
Na današnjem stepenu razvoja tehnologije, a u pitanju je 2020. godina, forward konvertor sa dva prekidača je razuman izbor za niz aplikacija.

Uticaj rasipne induktivnosti

U dosadašnjim razmatranjima rasipna induktivnost transformatora forward konvertora je bila zanemarena. Međutim, zbog velike magnetizacione induktivnosti čak i malo rasipanje može imati uočljive efekte. Stoga će ti efekti ovde biti razmotreni na primeru forward konvertora sa dva prekidača, kod koga ulogu snabera vrše diode za demagnetizaciju jezgra. Takav konvertor je prikazan na slici 25, gde je rasipanje svedeno na primarnu stranu, isto kao što je bilo urađeno prilikom odgovarajuće analize flyback konvertora.

Kako bi izgradili osećaj za efekte koje uzrokuje rasipna induktivnost, posmatrajmo ekvivalentno kolo u slučaju da oba prekidača vode i da vodi samo dioda $D1$, dakle svi prelazni procesi uključenja, o kojima će još biti reči, podrazumeva se da su prošli. Ekvivalentno kolo za tu varijaciju stanja prekidačkih elemenata je prikazano na slici 26 i to kolo je linearno. Analiza ovakvog kola je uvek moguća, jedino je pitanje koliko će dobijeni analitički izrazi biti složeni za praćenje.

U cilju sagledavanja uvećane složenosti jednačina koje izaziva prisustvo rasipne induktivnosti



Slika 26: Forward konvertor sa dva prekidača, izdvojene magnetizaciona i rasipna induktivnost, ekvivalentna šema za uključene prekidače.

L_σ , prvi cilj će biti određivanje napona na kalemovima, kopromenljivih stanja sistema sa slike 26. Pre svega, prema Kirhofovom zakonu za napone i karakteristici elementa idealnog transformatora dobija se

$$n v_{Lm} - v_L = V_{OUT} \quad (34)$$

i

$$v_{Lm} + v_{L\sigma} = V_{IN}. \quad (35)$$

Za određivanje v_L , v_{Lm} i $v_{L\sigma}$ potrebna je još jedna jednačina i ona je zasnovana na Kirhofovom zakonu za struje za čvor u kome se susište magnetizaciona induktivnost, primar idealnog transformatora i rasipna induktivnost,

$$i_{Lm} + n i_L = i_{L\sigma} \quad (36)$$

što diferenciranjem po vremenu i zamenom karakteristika elemenata za kalemove daje

$$\frac{v_{Lm}}{L_m} + \frac{v_L}{L} - \frac{v_{L\sigma}}{L_\sigma} = 0. \quad (37)$$

Sistem jednačina (34), (35) i (37) je linearan i moguće ga je jednoznačno rešiti po v_L , v_{Lm} i $v_{L\sigma}$, za šta je povoljno koristiti program za simboličko računanje pošto rešenje nije očigledno. Rezultat je

$$v_L = \frac{1}{1 + \frac{L_\sigma}{L_m} + n \frac{L_\sigma}{L}} n V_{IN} - \frac{1 + \frac{L_\sigma}{L_m}}{1 + \frac{L_\sigma}{L_m} + n \frac{L_\sigma}{L}} V_{OUT} \quad (38)$$

što se za $L_\sigma \rightarrow 0$ svodi na $v_L \rightarrow n V_{IN} - V_{OUT}$, zatim

$$v_{Lm} = \frac{1}{1 + \frac{L_\sigma}{L_m} + n \frac{L_\sigma}{L}} V_{IN} + \frac{\frac{L_\sigma}{L}}{1 + \frac{L_\sigma}{L_m} + n \frac{L_\sigma}{L}} V_{OUT} \quad (39)$$

što se za $L_\sigma \rightarrow 0$ svodi na $v_{Lm} \rightarrow V_{IN}$ i

$$v_{L\sigma} = \frac{\frac{L_\sigma}{L_m} + n \frac{L_\sigma}{L}}{1 + \frac{L_\sigma}{L_m} + n \frac{L_\sigma}{L}} V_{IN} - \frac{\frac{L_\sigma}{L}}{1 + \frac{L_\sigma}{L_m} + n \frac{L_\sigma}{L}} V_{OUT} \quad (40)$$

što se za $L_\sigma \rightarrow 0$ svodi na $v_{L\sigma} \rightarrow 0$. Iz (38), (39) i (40) može se zaključiti da rasipna induktivnost utiče na sve napone kalemova u slučaju da su prekidači uključeni, pa bi sada sa tim jednačinama valjalo ponovo sprovesti analizu ustaljenog stanja i odrediti izlazni napon konvertora. Pitanje opravdanosti ovakve analize se može postaviti, pošto se jednačine značajno komplikuju već modelovanjem jednog parazitnog efekta, a niz drugih parazitnih efekata se zanemaruje.

Izrazi (38), (39) i (40) su suviše složeni za praćenje efekata rasipne induktivnosti primenom simboličkog računanja. Stoga, ima smisla razmotriti pojednostavljen aproksimativan model, po kome L_σ neće bitno uticati na talasne oblike u ustaljenom stanju, već će uočljiv uticaj imati samo prilikom promena stanja prekidača. Povoljan model za kvalitativnu analizu uticaja rasipne induktivnosti je aproksimacija male talasnosti primenjena na filterski kalem L i magnetizacionu induktivnost L_m , što se u slučaju magnetizacione induktivnosti svodi na zanemarivanje njene struje koja diskontinualno teče (postoji interval kada je jednaka nuli) u odnosu na preslikanu struju sekundara $n i_L$. Stoga, smatraćemo da je $i_L \approx I_{OUT}$ i da je $i_{Lm} \approx 0$, što su posledice pretpostavki $L_m \rightarrow \infty$ i $L \rightarrow \infty$. Zanimljivo je uočiti da ove dve pretpostavke izraze (38), (39) i (40) redukuju na isti način kao što je to činila pretpostavka $L_\sigma \rightarrow 0$, na $v_L \rightarrow n V_{IN} - V_{OUT}$, $v_{Lm} \rightarrow V_{IN}$ i $v_{L\sigma} \rightarrow 0$. Ovo je očekivano, pošto uvedene pretpostavke čine rasipnu induktivnost zanemarivom u odnosu na ostale induktivnosti u kolu.

Kako je pod navedenim pretpostavkama $i_{L\sigma} = n i_{D1}$, struja diode D1 neće moći trenutno da se menja, pošto to ne dopušta struja rasipne induktivnosti $i_{L\sigma}$, a to je uzrok fenomena čije prikazivanje je cilj ove analize. Kirhofov zakon za struje uslovljava

$$i_{D1} + i_{D2} = i_L \quad (41)$$

a po uvedenim pretpostavkama smatramo da $i_{D1} = \frac{1}{n} i_{L\sigma}$ i $i_L = I_{OUT}$. Ova veza uzrokuje da osim i_{D1} i i_{D2} neće moći trenutno da se menja, biće neprekidna funkcija vremena, pa će prenošenje struje između dioda biti vršeno tokom intervala vremena kada provode obe diode D1 i D2, u kome postepena promena i_{D1} dovodi do postepene promene i_{D2} . Ovo smanjuje prekidačke gubitke, impuls struje kod “reverse recovery” procesa na diodama, kao što smanjuje i smetnje koje kolo generiše, što je redak primer parazitnog efekta koji doprinosi željenim osobinama u radu kola.

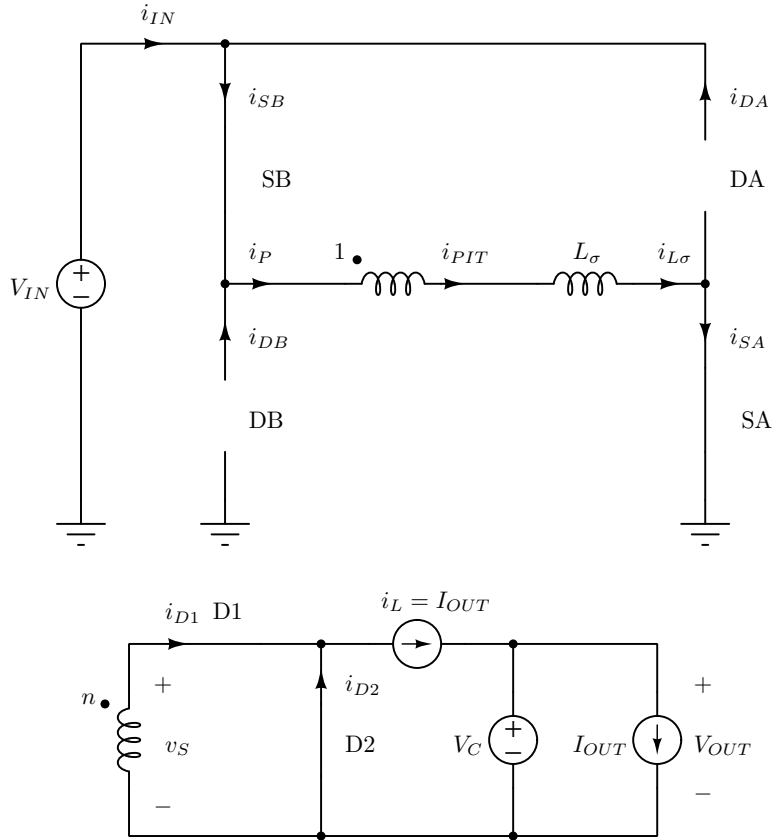
Proces prenosa provođenja sa D2 na D1 iniciran uključanjem prekidača može se razmatrati pomoću ekvivalentne šeme sa slike 27. Uključenje prekidača dočekuje već provodna dioda D1, ali na rubu provođenja, sa strujom bliskom nuli. Da bi dioda D1 preuzela struju $i_L = I_{OUT}$, struja $i_{L\sigma}$ treba da poraste od $i_{L\sigma}(0) = 0$ do $i_{L\sigma}(t_{on}) = n I_{OUT}$. Kako je za provodne diode D1 i D2 transformator u kratkom spoju, imamo da je tokom procesa prenosa provođenja $v_{L\sigma} = V_{IN}$, pa je

$$L_\sigma \frac{di_{L\sigma}}{dt} = L_\sigma \frac{n I_{OUT}}{t_{on}} = V_{IN} \quad (42)$$

odakle je

$$t_{on} = \frac{n L_\sigma I_{OUT}}{V_{IN}}. \quad (43)$$

Tokom ovog intervala napon na sekundaru je jednak nuli, pa se ne primećuje da su prekidači uključeni. To će se videti tek kada D2 prestane da vodi, po isteku t_{on} , što efektivno skraćuje DT_S interval pozitivnog impulsa napona $v_S = n v_{Lm}$ na sekundaru, kako je prikazano na slici 28.



Slika 27: Forward konvertor sa dva prekidača, ekvivalentna šema za proces uključenja prekidača.

Druga situacija kada diode D1 i D2 postepeno razmenjuju struju je inicirana isključivanjem prekidača SA i SB. Struja rasipne induktivnosti $i_{L\sigma}$ mora da nastavi da teče, što uzrokuje provođenje dioda DA i DB i promenu polariteta napona na primarnom namotaju transformatora. Ovo uzrokuje provođenje diode D2, pa je opet idealni transformator u kratkom spoju, $v_{Lm} = 0$, a struja $i_{L\sigma}$ od $i_{L\sigma}(DT_S) = n I_{OUT}$ pada na $i_{L\sigma}(DT_S + t_{off}) = 0$ prema

$$L_{\sigma} \frac{di_{L\sigma}}{dt} = L_{\sigma} \frac{-n I_{OUT}}{t_{off}} = -V_{IN} \quad (44)$$

pa opet dobijamo isto trajanje prelaznog procesa

$$t_{off} = \frac{n L_{\sigma} I_{OUT}}{V_{IN}}. \quad (45)$$

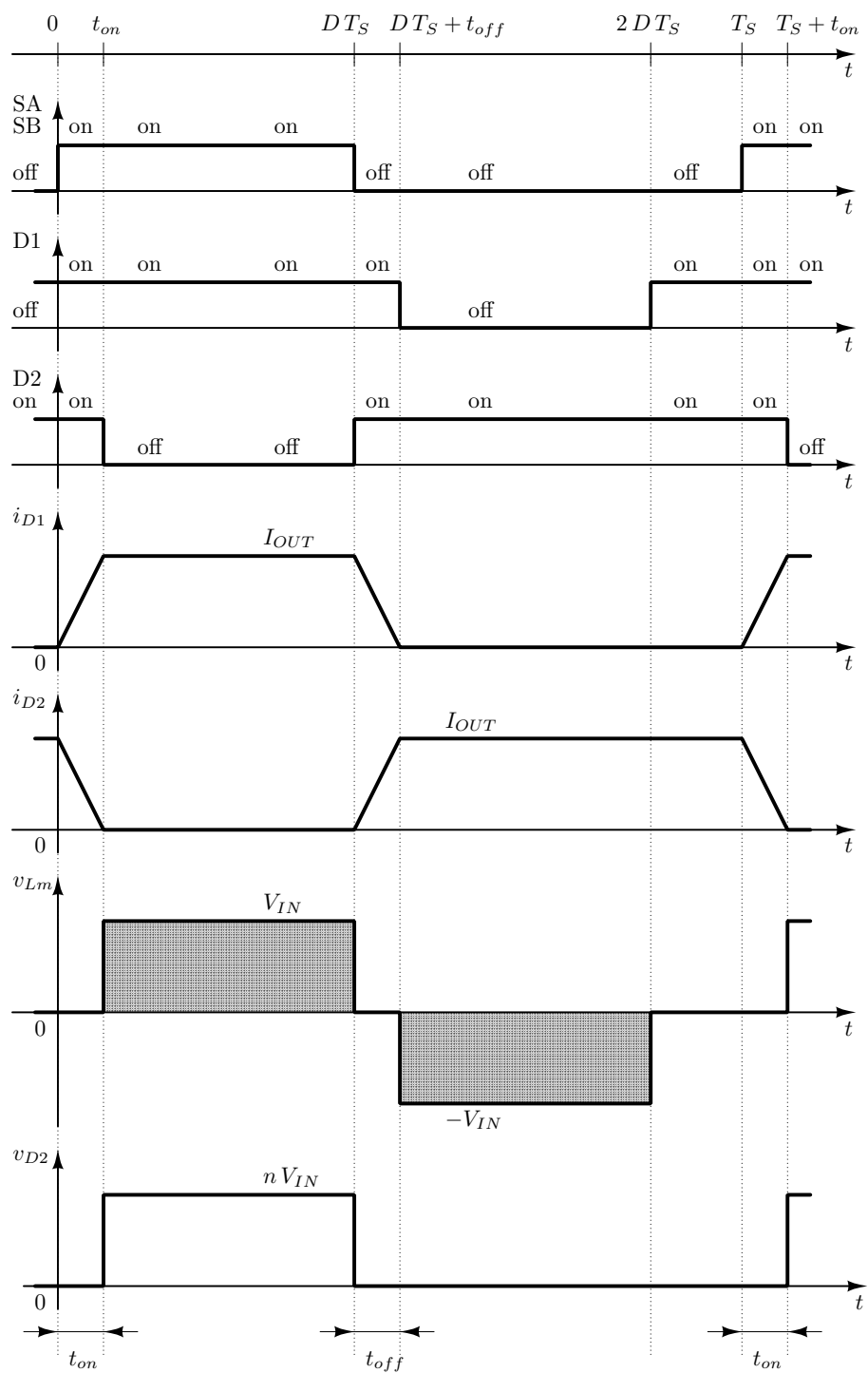
Promena napona sekundaru transformatora je istovremena kada i trenutak isključenja prekidača, kako je prikazano na slici 28, pa u ovom slučaju nema uticaja na efektivni duty ratio kao u slučaju uključenja prekidača.

Opisani efekti dovode do promene trajanja pozitivnog impulsa napona v_S na sekundaru transformatora skraćivanjem za t_{on} . To skraćuje efektivni duty ratio i utiče na izlazni napon (dobija se kao srednja vrednost inverznog napona na diodi D2, v_{D2} , datog na slici 28) koji je sada

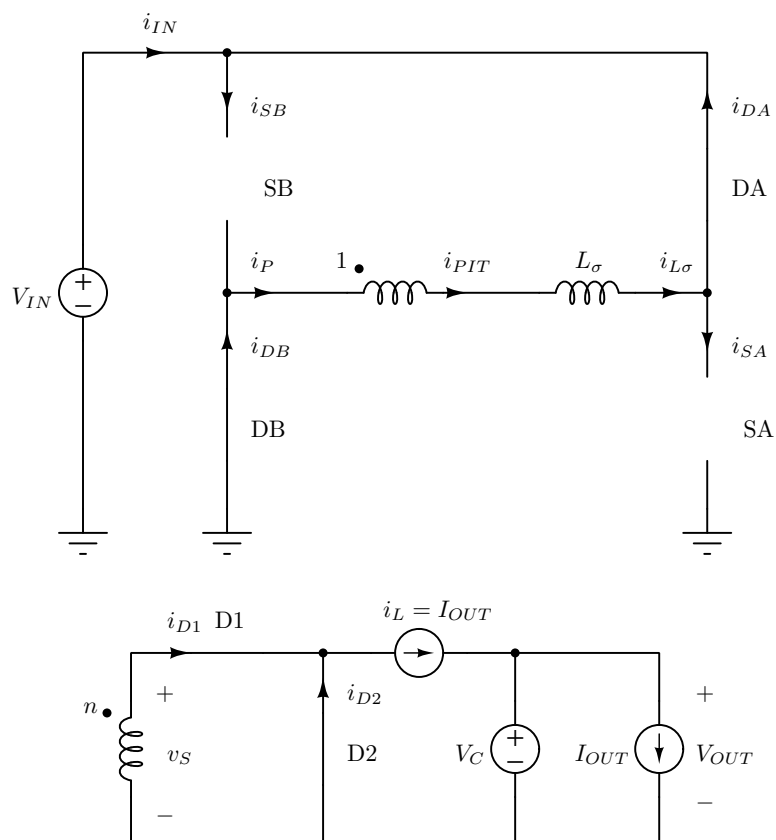
$$V_{OUT} = n \left(D - \frac{n L_{\sigma} I_{OUT}}{V_{IN} T_S} \right) V_{IN} = n D V_{IN} - f_S n^2 L_{\sigma} I_{OUT} \quad (46)$$

što uvodi izlaznu otpornost konvertora $R_{OUT} = f_S n^2 L_{\sigma}$.

Opisani efekti nisu prisutni samo kod forward konvertora, već se ispoljavaju i kod tri konvertora čije razmatranje sledi: push-pull, full bridge i half bridge, često u još složenijoj formi. Treba uočiti da čak i mali parazitni efekat, poput rasipne induktivnosti, može značajno



Slika 28: Forward konvertor sa dva prekidača, prelazni procesi kod dioda na sekundarnoj strani.



Slika 29: Forward konvertor sa dva prekidača, ekvivalentna šema za proces isključenja prekidača.

da zakomplikuje analizu, promeni sekvencu varijacija stanja prekidačkih elemenata kroz koju konvertor prolazi, kao i da napravi glomazne jednačine, pa je za prihvatljivu složenost rezultata potrebno uvoditi smislene aproksimacije. Na kraju analize svakako treba rezultate proveriti simulacijom, a definitivni sud daju samo eksperimentalni rezultati.