

## طراحی و شبیه سازی مبدل افزایشنده DC-DC با ساختار

### اینترلیو و سلفهای تزویج

حامد هاتف<sup>۱</sup>، ابراهیم سیفی نجمی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، موسسه غیرانتفاعی غیر دولتی رشديه، تبریز، ایران hamedhatef76@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی برق، موسسه غیرانتفاعی غیر دولتی رشديه، تبریز، ایران E.seifi@azaruniv.ac.ir

#### چکیده

در این تحقیق یک مبدل افزایشنده DC-DC با ساختار اینترلیو با بهره ولتاژ بالا ارائه شده است که وجود سلفهای تزویج باعث افزایش قابل توجه بهره ولتاژ از طریق افزایش نسبت دور سیم پیچها می باشد. همچنین تکنیک چندبرابر کننده بهره ولتاژ در ساختار اینترلیو وجود دارد که باعث افزایش بهره ولتاژ به طور قابل توجهی می شود. ساختار مبدل پیشنهادی به گونه ای می باشد که برای تولید ولتاژ بالا نیاز به مقدار دیوتی سایکل بالا در کلیدهای قدرت نیست که منجر به کاهش تلفات می شود. مقدار استرس ولتاژ بر روی المانهای نیمه هادی نیز کم می باشد. مبدل افزایشنده پیشنهادی در نرم افزار MATLAB شبیه سازی شده و همچنین، عملکرد صحیح مبدل پیشنهادی توسط نرم افزار MATLAB اثبات می شود.

#### واژه های کلیدی

ساختار اینترلیو- مبدل افزایشنده DC-DC، سلفهای تزویج، بهره ولتاژ بالا

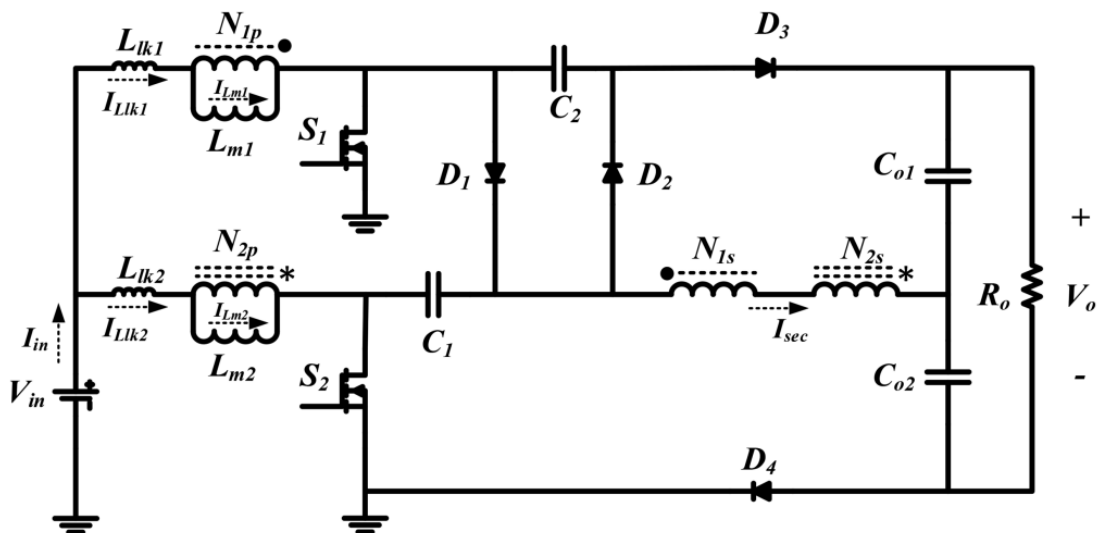
#### ۱. مقدمه

مبدل های افزایشنده DC-DC به طور گسترده ای در انرژی های تجدیدپذیر بکار می روند چونکه ولتاژ خروجی انرژی های تجدیدپذیر از جمله پانل های خورشیدی و پیل های سوختی پایین می باشد. این مبدل ها به طور گسترده ای در منابع تغذیه بدون وقفه، خودروهای برقی، ژنراتورهای ترموالکتریک و لامپ های تخلیه گاز در چراغ های اتومبیل ها بکار می روند [۱-۳]. در مبدل های ایزوله بهره ولتاژ بالا از طریق نسبت دور ترانسفورماتورها حاصل می شود اما تعداد نسبت دور بالای ترانسفورماتورها باعث افزایش سایز و وزن مبدل شده و همچنین باعث کاهش بازده و افزایش تلفات می شود [۴]. مبدل های افزایشنده غیر-ایزوله بهره ولتاژ بالایی دارند اما این مبدل ها دارای مشکل بازیابی معکوس و بازده کم در بهره ولتاژ بالا هستند [۵]. در مبدل های افزایشنده سه-سطحی استرس ولتاژ المان های نیمه هادی نصف شده سایز سلف ورودی کاهش می یابد اما بهره ولتاژ مانند مبدل افزایشنده مرسوم می باشد [۶]. تکنیک های متفاوتی برای حل مشکلات فوق الذکر توسط محققان به کار گرفته شده اند که یکی از آنها تکنیک سلول های چندبرابر کننده ولتاژ (VMCs) می باشد و این تکنیک بهره ولتاژ بالایی را تولید می کند و استرس ولتاژ بر روی المان ها نیز کم می باشد اما در این تکنیک تلفات بازیابی معکوس زیاد می باشد [۷]. مبدل هایی که در ساختارشان از سلف های تزویج استفاده شده نیز برای تولید بهره ولتاژ بالا به کار می روند و استرس ولتاژ المان ها نیز کم می باشد. همچنین مشکل بازیابی معکوس نیز کاهش خواهد یافت اما به دلیل سلف نشتی جهش ناگهانی ولتاژ بالا می باشد [۸-۹] و این مشکل با استفاده از مدار کلمپ اکتیو یا پسیو حل می شود.

یک مبدل افزایشنده با ساختار اینترلیو برای کاهش ریپل جریان ورودی و همچنین کاهش استرس ولتاژ روی کلیدهای قدرت در مرجع [۱۰] پیشنهاد شده است. برای کاهش جریان ورودی از تکنیک سیم پیچی سلفهای تزویج (WCCIS) نیز استفاده می شود [۱۱]. در مبدل پیشنهادی از تکنیک WCCIS جهت کاهش ریپل ورودی استفاده شده و مشکل بازیابی معکوس دیودهای خروجی نیز به دلیل استفاد از سلفهای نشتی کاهش یافته است. استرس ولتاژ بر روی المانها نیز کم می باشد. در این تحقیق، حالات کاری مبدل پیشنهادی بررسی می شود و نتایج شبیه سازی با استفاده نرم افزار MATLAB/Simulink انجام خواهد شد.

### ۲. ساختار مبدل پیشنهادی

شماتیک مبدل پیشنهادی در شکل ۱ قابل مشاهده است که هریک از سلفهای تزویج با ترانسفورماتورهای ایده آل به وسیله سلفهای مغناطیسی  $L_{m1}$  و  $L_{m2}$  مدل شده اند. مبدل پیشنهادی علاوه بر سلفهای مغناطیسی  $L_{m1}$  و  $L_{m2}$  از سلفهای نشتی  $L_{lk1}$  و  $L_{lk2}$  -خازنهای  $C_1$  و  $C_2$  که همراه با دیودهای  $D_1$  و  $D_2$  تشکیل دهنده مدار کلمپ هستند، تشکیل می شود. همچنین مبدل پیشنهادی دارای دیودهای خروجی  $D_3$  و  $D_4$  و خازنهای خروجی  $C_{o1}$  و  $C_{o2}$  می باشد. سیم پیچی اولیه سلفهای تزویج  $N_{1p}$  و  $N_{2p}$  می باشند و سیم پیچی ثانویه سلفهای تزویج  $N_{1s}$  و  $N_{2s}$  هستند. نسبت دور سلفهای تزویج  $n = N_{1s} / N_{1p} = N_{2s} / N_{2p}$  تعریف شده است. شیفت فازی بین کلیدها برابر  $180^\circ$  درجه می باشد.



شکل ۱. ساختار مبدل پیشنهادی

### ۱.۲. بررسی عملکرد مبدل پیشنهادی در حالت پیوسته کاری CCM

در این تحقیق، مبدل پیشنهادی در حالت پیوسته کاری (CCM) بررسی شده و مدار معادل مبدل پیشنهادی در شکل ۶ مدکاری در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین شکل موجهای ولتاژ و جریان المانها در شکل ۳ می توان مشاهده کرد.

مدکاری اول: در مدکاری اول کلید  $S_2$  خاموش بوده و دیودهای  $D_2$  و  $D_4$  بایاس مستقیم هستند. انرژی سلف نشتی  $L_{lk2}$  به همراه انرژی ذخیره شده در خازن  $C_1$  به خازن کلمپ  $C_2$  انتقال پیدا می کنند. همچنین، منبع تغذیه ورودی، سلف مغناطیسی  $L_{m2}$  و خازن  $C_1$  انرژی خود را به خازن خروجی  $C_{o2}$  انتقال می دهند. سلف مغناطیسی  $L_{m1}$  نیز توسط منبع ورودی شارژ می شود. در این مدکاری روابط زیر حاصل می شوند:

$$i_{Lk1}(t) = i_{Lk1}(t_0) - \frac{(n+1)V_{C2} - nV_{C1} - V_{Co2}}{2nL_{lk}}(t - t_0) \quad (1)$$

# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

$$i_{Lk2}(t) = i_{Lk2}(t_0) - \frac{(n+1)V_{C2} - nV_{C1} - V_{CO2}}{2nL_k}(t - t_0) \quad (2)$$

مد کاری دوم: در این مد کاری دیود  $D_2$  خاموش می باشد و خازن  $C_{O2}$  هنوز از طریق ولتاژ ورودی، سلف مغناطیسی  $L_{m2}$  و خازن  $C_1$  شارژ می شود. همچنین سلف مغناطیسی  $L_{m1}$  به همراه سلف نشستی  $L_{k1}$  از منبع ولتاژ ورودی انرژی دریافت می کنند. خازن خروجی  $C_{O1}$  انرژی بار را تأمین می کند. روابط حاصله از مد کاری دوم عبارتند از:

$$i_{Lm1}(t) = i_{Lm1}(t_1) + \frac{2nV_{in} - (n+1)V_{C2} + nV_{C1} + V_{CO2}}{L_m}(t - t_1) \quad (3)$$

$$i_{Lm2}(t) = i_{Lm2}(t_1) + \frac{2nV_{in} - (n-1)V_{C2} + nV_{C1} - V_{CO2}}{2nL_m}(t - t_1) \quad (4)$$

مد کاری سوم: کلید  $S_2$  در این مد کاری تحت ZCS روشن می باشد. سلف نشستی  $L_{k2}$  به طور سریع افزایش می یابد و زمانی که جریان سلف نشستی  $L_{k2}$  به جریان سلف مغناطیسی  $L_{m2}$  می رسد، دیود  $D_4$  بایاس معکوس می شود. هر دو کلید قدرت روشن بوده و همه دیودها بایاس معکوس می باشند و سلف ورودی از طریق ترمینال ورودی شارژ می شود. روابط این مد کاری به صورت زیر می باشند:

$$i_{Lm1}(t) = i_{Lm1}(t_2) + \frac{V_{in} - V_{Lk}}{L_m}(t - t_2) \quad (5)$$

$$i_{Lm2}(t) = i_{Lm2}(t_2) + \frac{V_{in} - V_{Lk}}{L_m}(t - t_2) \quad (6)$$

مد کاری چهارم: در مد کاری چهارم کلید قدرت  $S_1$  خاموش بوده و دیودهای  $D_1$  و  $D_3$  بایاس مستقیم می باشند. انرژی ذخیره شده در سلف نشستی  $L_{k1}$  به خازن  $C_1$  از طریق دیود  $D_1$  و کلید قدرت  $S_2$  انتقال می یابد. همچنین، انرژی ذخیره شده در خازن کلمپ  $C_2$  به خازن خروجی  $C_{O2}$  از طریق دیود  $D_3$  انتقال می یابد. کلید قدرت  $S_2$  هنوز روشن بوده و سلف نشستی  $L_{k2}$  با سلف مغناطیسی  $L_{m2}$  از طریق منبع ورودی شارژ می شود. خازن خروجی  $C_{O2}$  انرژی بار را تأمین می کند. معادلات این مد کاری عبارتند از:

$$i_{Lk1}(t) = i_{Lk1}(t_3) + \frac{V_{C2} + nV_{C1} - V_{CO1}}{2nL_k}(t - t_3) \quad (7)$$

$$i_{Lk2}(t) = i_{Lk2}(t_3) - \frac{V_{C2} + nV_{C1} - V_{CO1}}{2nL_k}(t - t_3) \quad (8)$$

مد کاری پنجم: در این مد کاری جریان سلف نشستی  $L_{k1}$  کاهش پیدا کرده و دیود  $D_1$  تحت ZCS خاموش خواهد شد. خازن خروجی  $C_{O1}$  از طریق ولتاژ ورودی، خازن  $C_2$  و سلف مغناطیسی  $L_{m1}$  شارژ شده و جریان سلف مغناطیسی  $L_{m1}$  و سلف نشستی  $L_{k1}$  کاهش پیدا می کند زمانی که جریان سلف مغناطیسی  $L_{m2}$  و سلف نشستی  $L_{k2}$  افزایش می یابد. روابط حاصل شده از مد کاری پنج برابر هستند با:

$$i_{Lm1}(t) = i_{Lm1}(t_4) + \frac{2nV_{in} + V_{C2} - nV_{C1} - V_{CO1}}{2nL_m}(t - t_4) \quad (9)$$

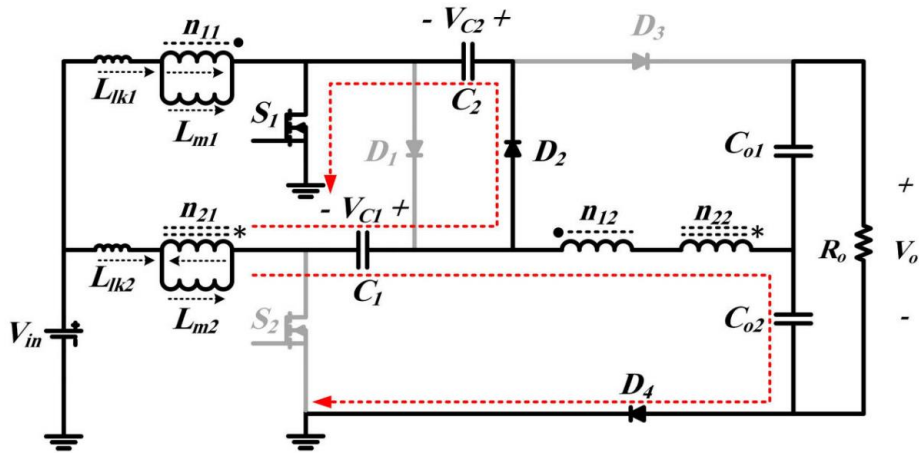
$$i_{Lm2}(t) = i_{Lm2}(t_4) + \frac{2nV_{in} - V_{C2} - nV_{C1} + V_{CO1}}{2nL_m}(t - t_4) \quad (10)$$

مد کاری ششم: در مد کاری ششم کلید قدرت  $S_1$  تحت ZCS روشن بوده و جریان سلف نشستی  $L_{k1}$  به شدت افزایش می یابد. زمانی که جریان سلف نشستی  $L_{k1}$  با جریان سلف مغناطیسی  $L_{m1}$  برابر می شود جریان سمت ثانویه صفر شده و دیود  $D_3$  بایاس معکوس می شود. هر دو کلیدهای قدرت در این مد کاری روشن می باشند و همه دیودها بایاس معکوس هستند. همچنین سلف ورودی از طریق ترمینال ورودی شارژ می شود.

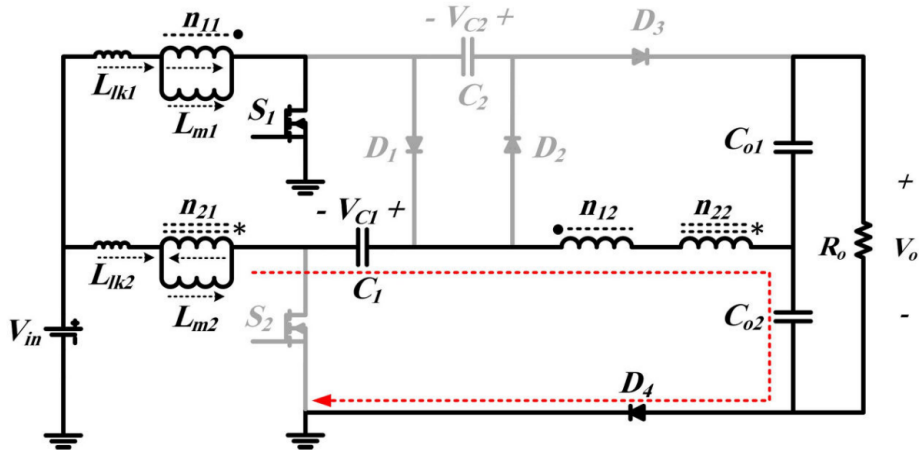
# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

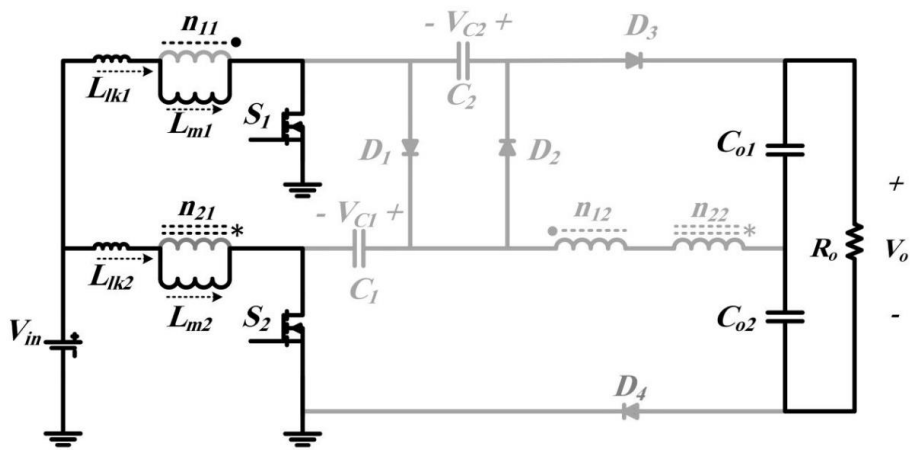
senaconf.ir



(الف)



(ب)

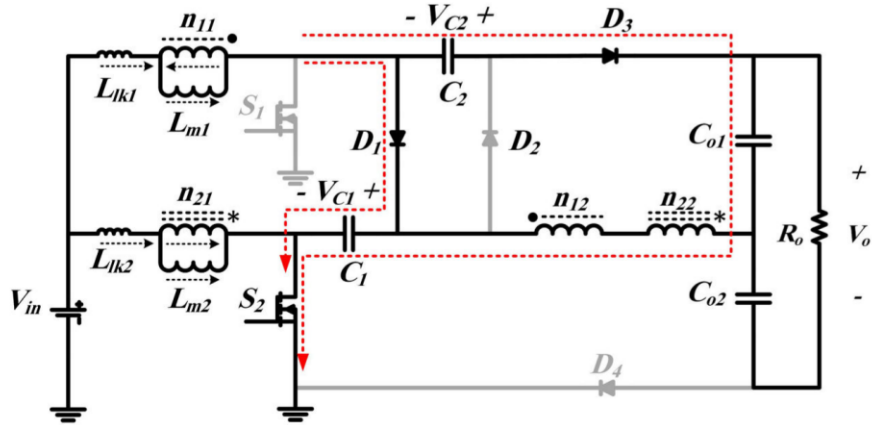


(ج)

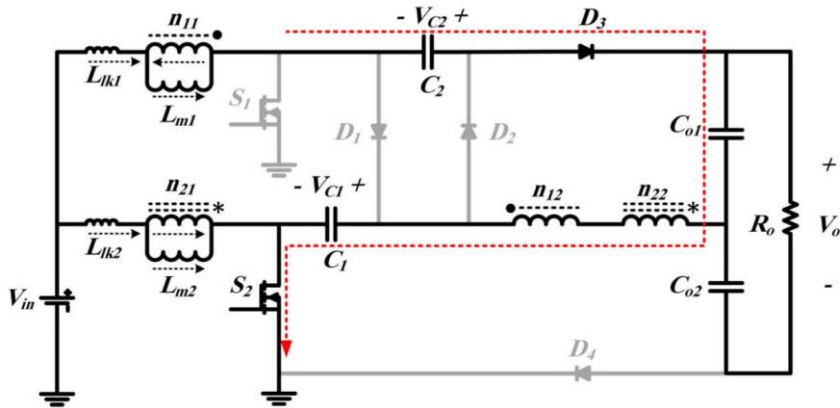
# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

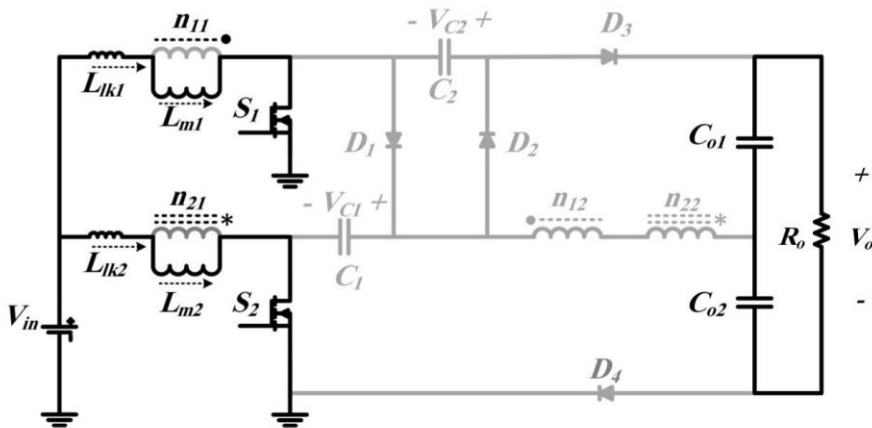
senaconf.ir



(ب)



(ج)



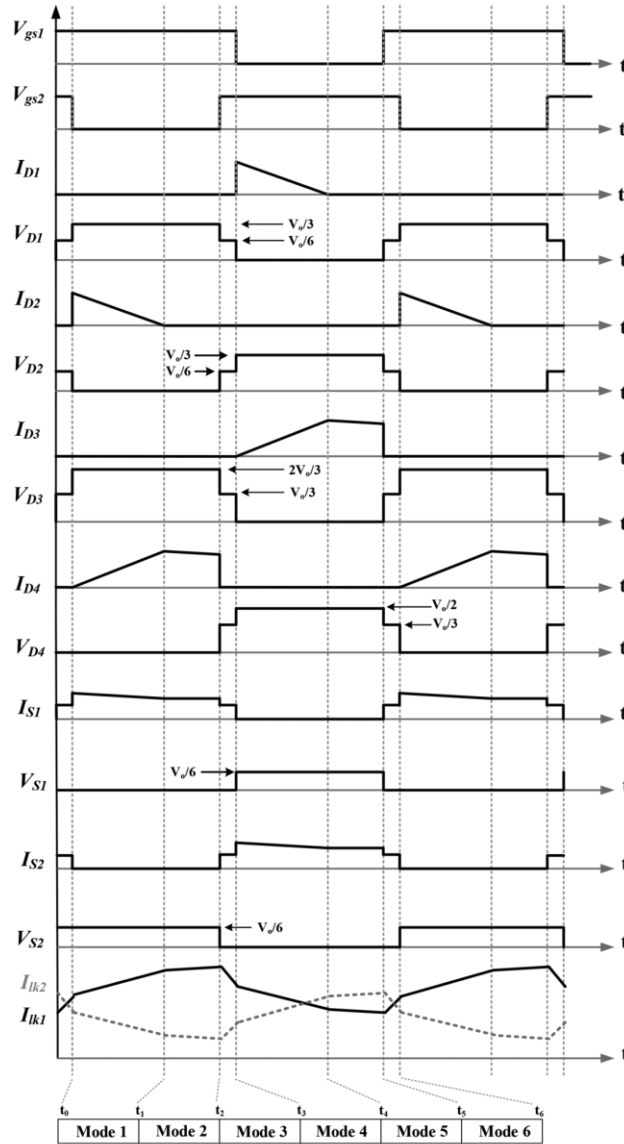
(د)

شکل ۲. مدار معادل مبدل پیشنهادی. مد کاری اول (الف)، مد کاری دوم (ب)، مد کاری سوم (ج)، مد کاری چهارم (د)، مد کاری پنجم (ه) و مد کاری ششم (و)

# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir



شکل ۳. شکل موج شکل موج‌های مبدل پیشنهادی در حالت پیوسته کاری CCM

## ۲.۲. محاسبه بهره ولتاژ و استرس ولتاژ المان‌های نیمه هادی

ضریب سلف‌های تزویج برابر است با:

$$k = \frac{L_m}{L_{lk} + L_m} \quad (11)$$

ولتاژ خازن  $C_1$  برابر است با:

$$V_{C1} = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (12)$$

با استفاده از قانون تعادل اصل ولت-ثانیه برای سلف مغناطیسی  $L_{m2}$  ولتاژ خازن  $C_2$  به صورت زیر خواهد بود:

$$kV_{in}DT = k(V_{C2} - V_{C1} - V_{in})(1-D)T \quad (13)$$

# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

$$V_{C2} = \frac{2V_{in}}{1-D} \quad (14)$$

زمانی که کلید قدرت  $S_1$  خاموش می‌باشد و دیود  $D_1$  روشن می‌باشد، ولتاژ خازن خروجی  $C_{O1}$  برابر است با:

$$V_{CO1} = V_{C2} + knV_{C1} \quad (15)$$

ولتاژ خازن خروجی  $C_{O2}$  به صورت زیر خواهد بود:

$$V_{CO2} = (1+kn)V_{C2} - knV_{C1} \quad (16)$$

ولتاژ خروجی حاصل جمع ولتاژ خازن‌های خروجی می‌باشد که به صورت زیر است:

$$V_{Out} = V_{CO1} + V_{CO2} \quad (17)$$

بهره ولتاژ مبدل پیشنهادی برابر است با:

$$\frac{V_{Out}}{V_{in}} = \frac{2(2+kn)}{1-D} \quad (18)$$

استرس ولتاژ کلیدها و دیودهای قدرت به صورت زیر خواهد بود:

$$V_{S1} = V_{S2} = \frac{V_{Out}}{2(2+kn)} \quad (19)$$

$$V_{D1} = V_{D2} = \frac{V_{Out}}{(2+kn)} \quad (20)$$

$$V_{D3} = \frac{2(1+kn)}{1-D} V_{in} = \frac{1+kn}{(2+kn)} V_{Out} \quad (21)$$

$$V_{D4} = \frac{(1+2kn)}{1-D} V_{in} = \frac{1+2kn}{2(2+kn)} V_{Out} \quad (22)$$

### ۳. نتایج شبیه‌سازی

پارامترها و مقادیر شبیه‌سازی در جدول زیر بیان شده و در ادامه تحقیق به نتایج شبیه‌سازی می‌پردازیم.

جدول ۱. پارامترهای شبیه‌سازی

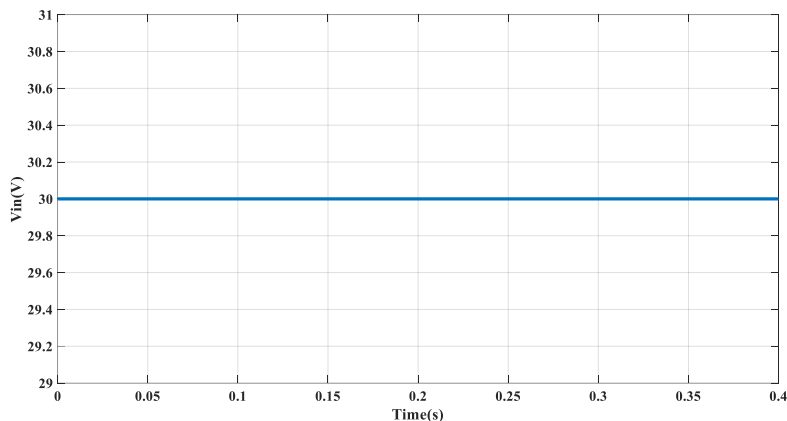
پارامتر	مقدار
ولتاژ ورودی	۳۰ ولت
فرکانس کلیدزنی	۱۰۰ KHz
$N = N_{1s} / N_{1p} = N_{2s} / N_{2p}$	۱
$C_1, C_2, C_{O1}, C_{O2}$	۴۷۰ میکروفاراد
k	۱
D	۰/۵
R	۱۰۰ اهم

# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

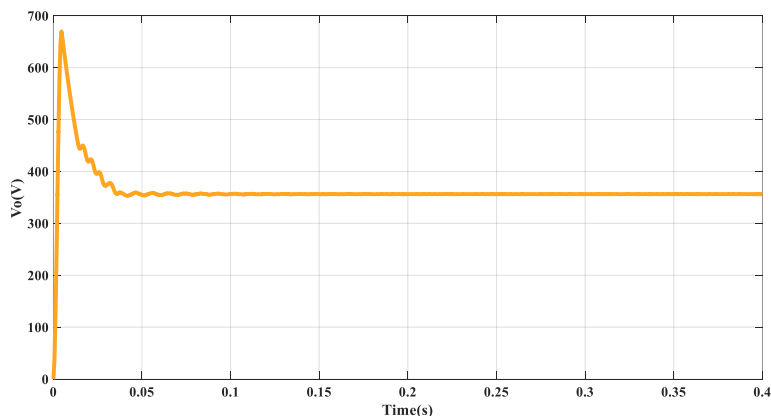
12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senacnf.ir

$V_o$	ولت ۳۶۰
-------	---------



شکل ۴: ولتاژ ورودی



شکل ۵: ولتاژ خروجی

ولتاژ ورودی مبدل پیشنهادی برابر با ۳۰ ولت بوده و مقدار سیکل کاری کلید قدرت برابر با ۰/۵ است، بنابراین با استفاده از رابطه بهره ولتاژ که رابطه (۱۸) است، ولتاژ خروجی را بدین صورت می‌باشد:

$$\frac{V_{Out}}{V_{in}} = \frac{2(2+kn)}{1-D} \Rightarrow V_{Out} = \frac{2(2+kn)}{1-D} V_{in} = \frac{2(2+1)}{1-0.5} \times 30 = 360(V) \quad (23)$$

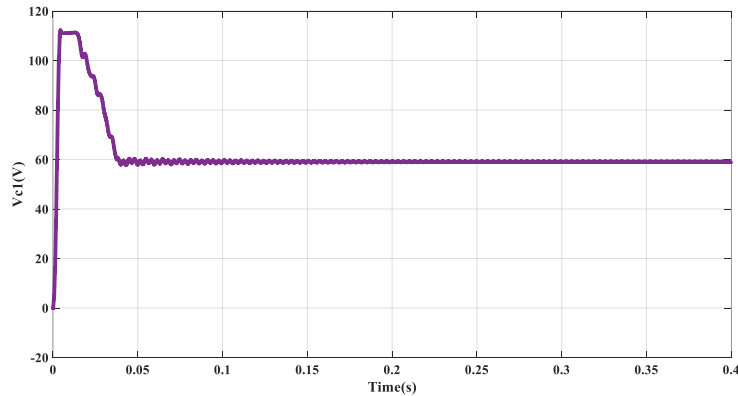
با مقایسه نتایج بدست آمده از شکل ۵ و رابطه (۲۳) نتیجه می‌شود که عملکرد مبدل پیشنهادی صحیح می‌باشد.



# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

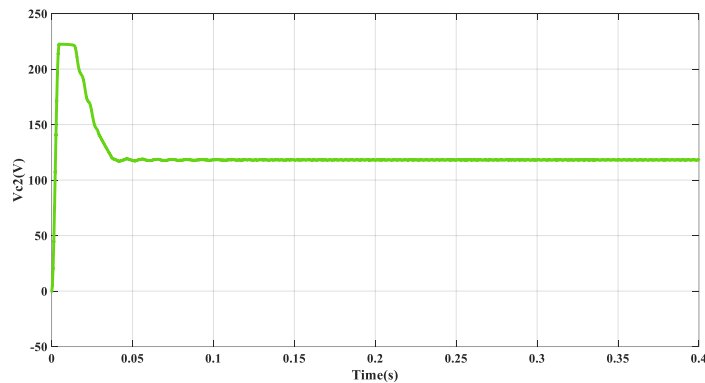
senaconf.ir



شکل ۶: ولتاژ خازن  $C_1$

ولتاژ خازن  $C_1$  از طریق رابطه (۱۲) بدست می‌آید:

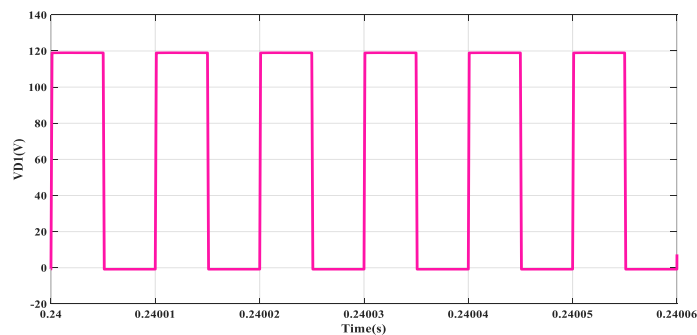
$$V_{C1} = \frac{V_{in}}{1-D} = \frac{30}{1-0.5} = 60(V) \quad (24)$$



شکل ۷: ولتاژ خازن  $C_2$

ولتاژ خازن  $C_2$  با استفاده از رابطه (۱۴) حاصل می‌شود:

$$V_{C2} = \frac{2V_{in}}{1-D} = \frac{2 \times 30}{1-0.5} = 120(V) \quad (25)$$



شکل ۸: ولتاژ دیود  $D_1$

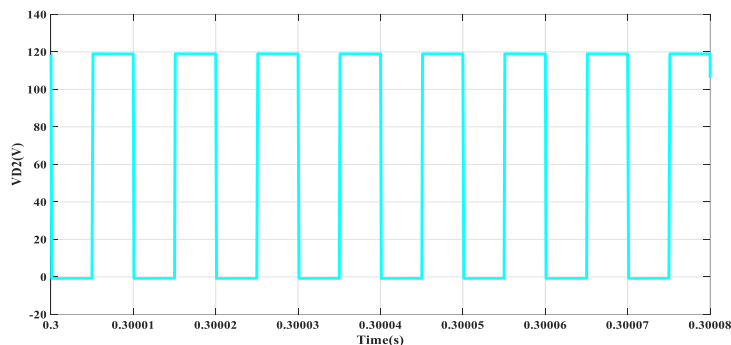
# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senacnf.ir

دیودها و کلیدهای قدرت به طور همزمان روشن و خاموش نمی‌شوند و در ۶ مدارهای متفاوتی از خاموش و روشن شدن دارند.  
شکل ۸ نشانگر ولتاژ دیود  $D_1$  می‌باشد که از طریق رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود:

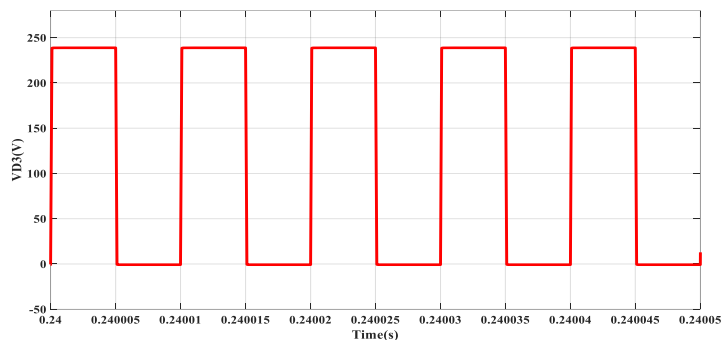
$$V_{D1} = \frac{V_{Out}}{(2+kn)} = \frac{360}{2+1} = 120(V) \quad (26)$$



شکل ۹: ولتاژ دیود  $D_2$

ولتاژ دیود  $D_2$  از رابطه (۲۰) بدست می‌آید که به صورت زیر است:

$$V_{D2} = \frac{V_{Out}}{(2+kn)} = \frac{360}{2+1} = 120(V) \quad (27)$$



شکل ۱۰: ولتاژ دیود  $D_3$

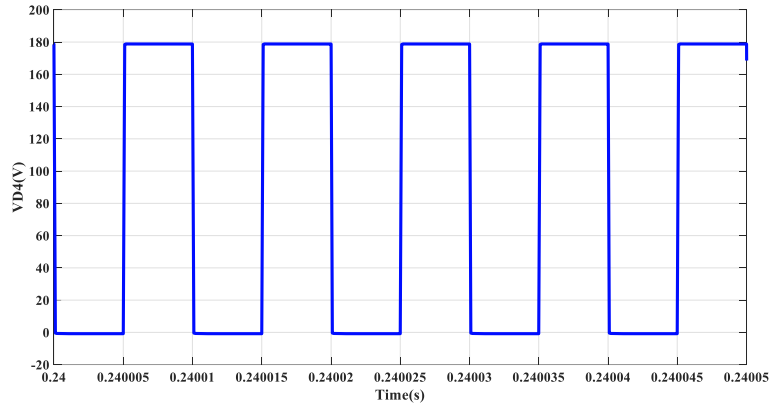
ولتاژ دیود  $D_3$  از رابطه (۲۱) حاصل می‌شود:

$$V_{D3} = \frac{2(1+kn)}{1-D} V_{in} = \frac{1+kn}{(2+kn)} V_{Out} = \frac{1+1}{2+1} \times 360 = 240(V) \quad (28)$$

# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

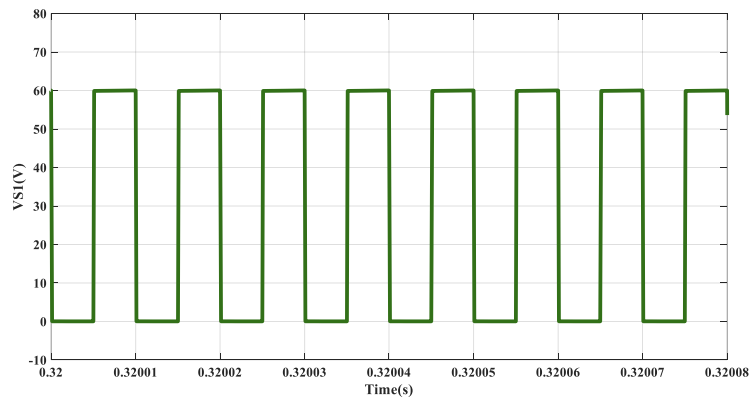
senacnf.ir



شکل ۱۱: ولتاژ دیود  $D_4$

ولتاژ دیود  $D_4$  از رابطه (۲۲) بدست آمده و به صورت زیر خواهد بود:

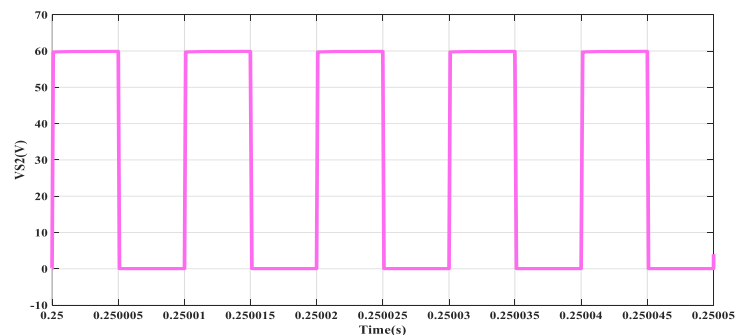
$$V_{D4} = \frac{(1+2kn)}{1-D} V_{in} = \frac{1+2kn}{2(2+kn)} V_{Out} = \frac{1+2}{2 \times (2+1)} \times 360 = 180(V) \quad (29)$$



شکل ۱۲: ولتاژ کلید  $S_1$

ولتاژ کلید  $S_1$  از رابطه (۱۹) بدست می آید:

$$V_{S1} = \frac{V_{Out}}{2(2+kn)} = \frac{360}{2 \times (2+1)} = 60(V) \quad (30)$$



شکل ۱۳: ولتاژ کلید  $S_2$

ولتاژ کلید  $S_2$  از رابطه (۱۹) حاصل می‌شود:

$$V_{s2} = \frac{V_{out}}{2(2+kn)} = \frac{360}{2 \times (2+1)} = 60(V) \quad (31)$$

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک مبدل DC-DC افزایشنده با ساختار اینترلیو پیشنهاد شده که در ساختار مبدل از سلف تزویج جهت افزایش بهره ولتاژ استفاده شده است. همچنین، در مبدل پیشنهادی از تکنیک VMCS نیز استفاده تا شده که بهره ولتاژ به طور قابل توجهی افزایش یابد. استرس ولتاژ بر روی المان‌های نیمه هادی کم می‌باشد و سلف‌های نشتی موجود در مبدل پیشنهادی مشکل بازایی معکوس دیودها را کاهش می‌دهند. مقدار ریپل جریان ورودی به شدت کاهش پیدا کرده است و تعداد المان‌های مبدل پیشنهادی کم بوده و هزینه ساخت مبدل را کاهش می‌دهد.

#### منابع

- [1] Tseng, K., Huang, C.: 'High step-up high-efficiency interleaved converter with voltage multiplier module for renewable energy system', IEEE Trans. Ind. Electron., 2014, 61, (3), pp. 1311–1319
- [2] Rathore, A.K., Prasanna, U.R.: 'Analysis, design, and experimental results of novel snubberless bidirectional naturally clamped ZCS/ZVS current fed half bridge DC/DC converter for fuel cell vehicles', IEEE Trans. Ind. Electron., 2013, 60, (10), pp. 4482–4491
- [3] Chen, S.M., Liang, T.J., Yang, L.S., et al.: 'A safety enhanced, high step-up DC-DC converter for AC photovoltaic module application', IEEE Trans. Power Electron., 2012, 27, (4), pp. 1809–1817
- [4] Gang, W., Xinbo, R., Zhihong, Y.: 'Nonisolated high step-up dc-dc converters adopting switched capacitor cell', IEEE Trans. Ind. Electron., 2015, 62, (1), pp. 383–393
- [5] Wuhua, L., Xiangning, H.: 'Review of nonisolated high-step-up dc/dc converters in photovoltaic grid connected applications', IEEE Trans. Ind. Electron., 2011, 58, (4), pp. 1239–1250
- [6] Schirone, L., Macellari, M.: 'Design of high-efficiency non-insulated step-up converters', IET Power Electron., 2015, 8, (5), pp. 743–749
- [7] Pan, C.T., Chuang, C.F., Chu, C.C.: 'A novel transformer-less adaptable voltage quadrupler DC converter with low switch voltage stress', IEEE Trans. Power Electron., 2014, 29, (9), pp. 4787–4796
- [8] Chen, S.M., Liang, T.J., Yang, L.S., et al.: 'A boost converter with capacitor multiplier and coupled inductor for AC module applications', IEEE Trans. Ind. Electron., 2013, 60, (4), pp. 1503–1511
- [9] Xuefeng, H., Gong, Ch.: 'A high voltage gain DC-DC converter integrating coupled-inductor and diode-capacitor techniques', IEEE Trans. Power Electron., 2014, 29, (2), pp. 789–800
- [10] Nouri, T., Hosseini, S.H., Babaei, E., et al.: 'Interleaved high step-up DC-DC converter based on three-winding high-frequency coupled inductor and voltage multiplier cell', IET Power Electron., 2015, 8, (2), pp. 175–189
- [11] Li, W., Zhao, Y., Wu, J., et al.: 'Interleaved high step-up converter with winding-cross-coupled inductors and voltage multiplier cells', IEEE Trans. Power Electron., 2012, 27, (1), pp. 133–143