

## مبدل چندپایانه‌ای بدون خازن: تحلیل، کلیدزنی، مدلسازی و کنترل

سید محمد دهقان<sup>۱</sup>، مجتبی حیدری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی قم، [dehghan@qut.ac.ir](mailto:dehghan@qut.ac.ir)

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی قم

### چکیده

در سالهای اخیر مبدل‌های چندپایانه‌ای متفاوت و متنوعی برای استفاده در کاربردهایی که چندین منبع-بار وجود دارد با اهدافی مختلفی چون کاهش قیمت، کاهش حجم، افزایش بازده و یا افزایش طول عمر پیشنهاد شده‌اند. این مقاله یک مبدل سه پایانه‌ای را، که جهت حذف خازن‌های حجیم معمول در باس مشترک مبدل‌ها پیشنهاد شده است، مورد تحلیل و بررسی قرار می‌دهد. در این مقاله چندین روش کلیدزنی مختلف برای مبدل مذکور ارائه گردیده است و نحوه پیاده‌سازی آنها تشریح و مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین مدل سیگنال کوچک مبدل مورد بحث استخراج شده است و جهت ارائه سیستم کنترل مستقل برای هر پایانه، با استفاده یک روش پیشنهادی جداسازی، تأثیر ولتاژ پایانه‌ها بر روی یکدیگر حذف گردیده است. این مقاله در نهایت یک سیستم کنترل بر اساس روش بهینه‌سازی دامنه برای مبدل مذکور ارائه داده است. جهت بررسی صحت و کارایی تحلیل‌ها و روش‌های پیشنهادی، مبدل مورد بحث شبیه‌سازی شده است.

### کلیدواژه

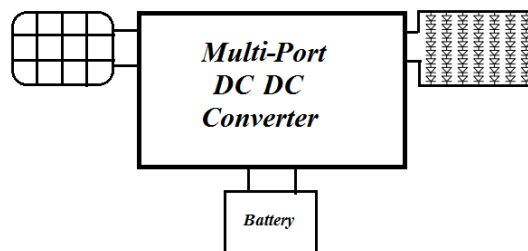
مبدل چندپایانه‌ای، الگوریتم کلیدزنی، مدل سیگنال کوچک، بهینه‌سازی دامنه

### مقدمه

علی‌الرغم مقرون به مصرفه بودن، و افزایش قابل اطمینان و طول عمر سیستم، باعث ایجاد پیچیدگی در کنترل مبدل شده است. در [۱۵]، مبدل پیشنهاد شده در [۱۴]، برای یک سیستم شارژر خورشیدی به همراه درایور LED به کار رفته است و با توجه نوع کاربرد، برای مبدل الگوریتم کلیدزنی، سیستم کنترل و روش طراحی ویژه پیشنهاد شده است. در این مقاله، مبدل پیشنهاد شده در [۱۴]، مورد تحلیل کامل قرار گرفته است و چندین روش کلیدزنی جدید برای آن ارائه شده است. هر یک از روش‌های مذکور ویژگی‌های متفاوتی را ارائه می‌دهند. همچنین مدل سیگنال کوچک مبدل مذکور ارائه شده است و بر اساس آن یک سیستم کنترل حلقه بسته برای مبدل پیشنهاد گردیده است.

محققان پیش‌بینی می‌کنند که در آینده نزدیک، منابع انرژی تجدیدپذیر پراکنده بصورت گسترده در شبکه قدرت مورد استفاده قرار خواهند گرفت. مبدل‌های الکترونیک قدرت نقشی کلیدی در اتصال این منابع به شبکه قدرت و بار بر عهده دارند [۶-۱۱]. در بسیاری از کاربردها چندین منبع، بار و یا ذخیره‌کننده انرژی مانند سلول خورشیدی، توربین بادی، بانک باطری، شبکه قدرت، بار محلی و غیره وجود دارند که به چندین مبدل برای اتصال آنها به یکدیگر نیاز می‌باشد. بسیاری از محققان جهت کاهش حجم و قیمت، افزایش بازده و پاسخ دینامیکی، و پیاده‌سازی کنترل متمرکز استفاده از مبدل‌های چندپایانه‌ای را بعنوان جایگزینی برای چندین مبدل دو پایانه‌ای مستقل مطرح کرده‌اند [۱۳-۱۷]. شکل ۱ مثالی از استفاده از یک مبدل چندپایانه‌ای در کاربرد انرژی خورشیدی را نشان می‌دهد. با توجه نوع کاربرد، هر یک از پایانه‌ها ممکن است AC یا DC، یک طرفه یا دوطرفه، و ایزوله و یا غیر ایزوله باشند [۱].

اخیراً یک مبدل چندپایانه‌ای دوطرفه جدید مطابق شکل ۲ توسط مرجع [۱۴] جهت استفاده در ریزشبکه‌های جریان مستقیم پراکنده ارائه شده است. این مبدل از اتصال چندین مبدل دوطرفه غیر ایزوله به یکدیگر به دست آمده است. در این مبدل خازن در نقطه اتصال حذف شده است، که این مسئله



شکل ۱. استفاده از مبدل سه پایانه‌ای در کاربرد شارژر خورشیدی شامل سلول خورشیدی، باطری و بار

جدول ۱. وضعیت کلیدهای نیمه هادی در ترکیب‌های مختلف کلیدزنی

	SW11	SW21	SW31	SW12	SW22	SW32
ST0	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON
ST1	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON
ST2	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON
ST3	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON
ST4	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF
ST5	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF
ST6	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
ST7	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF

با توجه به جدول ۲ مقدار متوسط نقطه میانی برابر است با:

$$V_m = \sum_{j=1}^8 D_j v_{m,Dj} = D_{eq1} N_1 V_1 + D_{eq2} N_2 V_2 + D_{eq3} N_3 V_3 \quad (۴)$$

جاییکه  $v_{m,Dj}$  ولتاژ لحظه‌ای نقطه میانی در طول دوره کلید زنی  $j$ -ام می‌باشد و همچنین:

$$D_{eq1} = D_1 + D_2 + D_6 + D_7 \quad (۵)$$

$$D_{eq2} = D_2 + D_3 + D_4 + D_7 \quad (۶)$$

$$D_{eq3} = D_4 + D_5 + D_6 + D_7 \quad (۷)$$

همچنین با توجه به اینکه متوسط ولتاژ سلف‌ها باید صفر باشد، می‌توان نوشت:

$$\sum_{j=1}^8 D_j v_{Lk,Dj} = D_{eqk} V_k - \sum_{j=1}^8 D_j v_{m,Dj} = D_{eqk} V_k - V_m = 0 \quad (۸)$$

جاییکه  $v_{Lk,Dj}$  ولتاژ لحظه‌ای سلف  $k$ -ام در طول دوره کلیدزنی  $j$ -ام می‌باشد و  $k = 1, 2, 3$ . با توجه به رابطه فوق می‌توان نوشت:

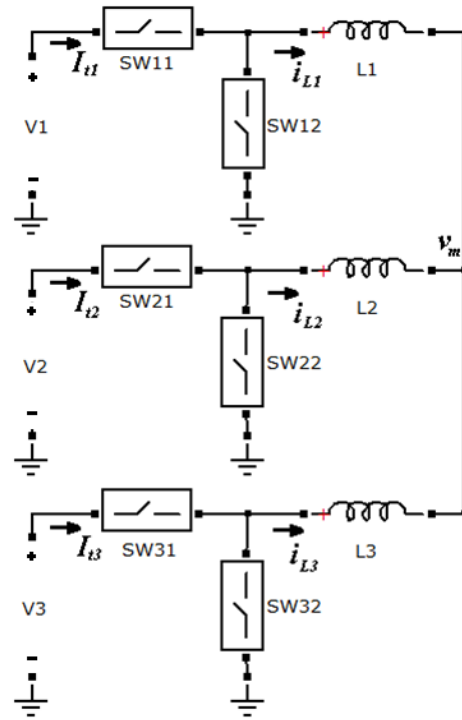
$$V_m = D_{eq1} V_1 = D_{eq2} V_2 = D_{eq3} V_3 \quad (۹)$$

از طرفی با متوسط‌گیری از جریان پایانه‌ها در وضعیت‌های مختلف، متوسط جریان پایانه‌ها برابرند با:

$$I_{T1} = D_1 i_{L1,D1} + D_2 i_{L1,D2} + D_6 i_{L1,D6} + D_7 i_{L1,D7} \quad (۱۰)$$

$$I_{T2} = D_2 i_{L2,D2} + D_3 i_{L2,D3} + D_4 i_{L2,D4} + D_7 i_{L2,D7} \quad (۱۱)$$

$$I_{T3} = D_4 i_{L3,D4} + D_5 i_{L3,D5} + D_6 i_{L3,D6} + D_7 i_{L3,D7} \quad (۱۲)$$



شکل ۲. مدل سه پایانه‌ای بدون خازن میانی

## تحلیل مبدل

مبدل شکل ۲ دارای شش کلید نیمه هادی می‌باشد که با توجه به اینکه وضعیت کلیدهای هر پایانه، مخالف هم می‌باشد بنابراین هشت ترکیب مختلف کلیدزنی بوجود خواهد آمد. جدول ۱، وضعیت کلیدها و شکل ۳، مدار معادل مبدل در این هشت وضعیت را نشان می‌دهند [۱۵]. معادلات ولتاژ لحظه‌ای نقطه میانی و سلف‌ها در هشت وضعیت مختلف، در جدول ۲ نمایش داده شده است. در معادلات مذکور ضرایب  $N_1$ ،  $N_2$  و  $N_3$  برابرند با:

$$N_1 = \frac{L_2 L_3}{L_1 L_2 + L_2 L_3 + L_3 L_1} \quad (۱)$$

$$N_2 = \frac{L_1 L_3}{L_1 L_2 + L_2 L_3 + L_3 L_1} \quad (۲)$$

$$N_3 = \frac{L_1 L_2}{L_1 L_2 + L_2 L_3 + L_3 L_1} \quad (۳)$$

اگر یکی از پایانه‌ها به مبدل متصل نباشد (هر دو کلید مربوط به آن خاموش باشند)، سلف مربوط به آن در روابط فوق برابر با بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شوند. برای مثال اگر پایانه دوم متصل نباشد:  $N_1 = L_3 / (L_1 + L_3)$ ،  $N_2 = 0$ ،  $N_3 = L_1 / (L_1 + L_3)$ .

الف) در این روش با توجه به سطح ولتاژ پایانه‌ها یکی از مجموعه‌های  $\{ST7, ST6, ST1, ST0\}$  و  $\{ST7, ST2, ST3, ST0\}$  یا  $\{ST7, ST4, ST5, ST0\}$  اعمال می‌گردد. لذا با توجه به (۵)، (۶)، (۷) و (۹) به ترتیب برای مجموعه‌های ذکر شده می‌توان نوشت:

$$V_m = (D_1 + D_2 + D_7)V_1 = (D_2 + D_7)V_2 = D_7V_3 \quad (۱۳)$$

$$V_m = (D_1 + D_6 + D_7)V_1 = D_7V_2 = (D_6 + D_7)V_3 \quad (۱۴)$$

$$V_m = (D_2 + D_7)V_1 = (D_2 + D_3 + D_7)V_2 = D_7V_3 \quad (۱۵)$$

$$V_m = D_7V_1 = (D_3 + D_4 + D_7)V_2 = (D_4 + D_7)V_3 \quad (۱۶)$$

$$V_m = (D_6 + D_7)V_1 = D_7V_2 = (D_5 + D_6 + D_7)V_3 \quad (۱۷)$$

$$V_m = D_7V_1 = (D_4 + D_7)V_2 = (D_4 + D_5 + D_7)V_3 \quad (۱۸)$$

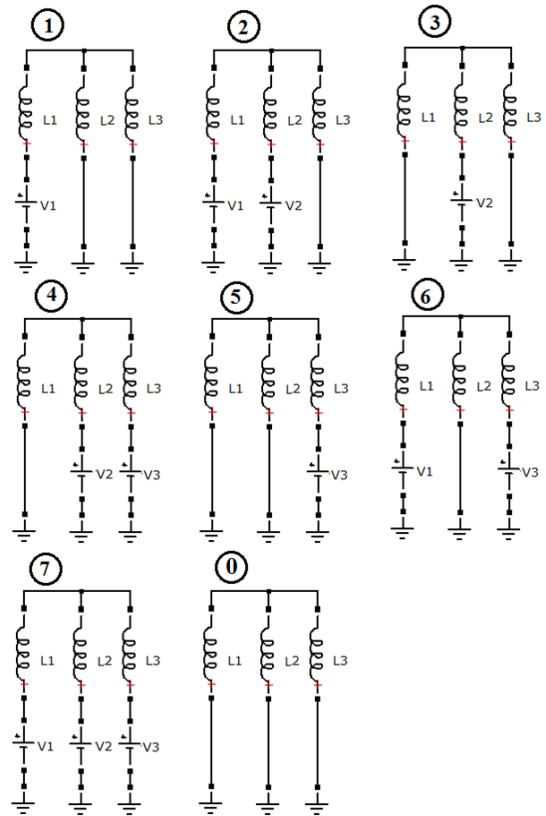
شکل ۴ روش کلیدزنی پیشنهادی و مجموعه  $\{ST7, ST4, ST5, ST0\}$  بعنوان مثال را نشان می‌دهد. شکل ۵ روش پیاده‌سازی روش پیشنهادی را نمایش می‌دهد در روش پیشنهادی از مقایسه سه سیگنال مرجع با یک سیگنال حامل، سیگنال‌های کلیدزنی برای پایانه‌های مختلف تولید می‌شود. با توجه به شکل‌های ۴ و ۵، و (۱۸) مقادیر سیگنال مرجع برای مجموعه  $\{ST4, ST5, ST7, ST8\}$  برابر است با:  $R_a = D_7, R_b = D_4 + D_7, R_c = D_4 + D_5 + D_7$ . این سیگنال‌های مرجع بصورت زیر نیز قابل بیان هستند:

$$R_a = V_{m-ref}/V_{1-ref} \quad (۱۹)$$

$$R_b = V_{m-ref}/V_{2-ref} \quad (۲۰)$$

$$R_c = V_{m-ref}/V_{3-ref} \quad (۲۱)$$

جاییکه  $V_{m-ref}, V_{1-ref}, V_{2-ref}$  و  $V_{3-ref}$  به ترتیب مقادیر مرجع برای ولتاژ متوسط نقطه میانی، پایانه اول، پایانه دوم و پایانه سوم می‌باشد. بدیهی است  $V_{m-ref}$  باید کوچکتر یا مساوی سه مقدار مرجع دیگر باشد. می‌توان اثبات نمود روابط (۱۹) الی (۲۱) برای تولید سیگنال‌های مرجع تمام شش مجموعه کلیدزنی قابل استفاده می‌باشد. لذا با استفاده از روابط فوق و شکل ۵ به راحتی می‌توان روش کلیدزنی پیشنهادی را پیاده‌سازی کرد.



شکل ۳. مدار معادل مبدل در ترکیب‌های مختلف کلیدزنی شامل هشت حالت مختلف

جدول ۲: معادلات ولتاژ لحظه‌ای نقطه میانی و سلف‌ها در وضعیت‌های کلیدزنی مختلف

	$v_{L1}$	$v_{L2}$	$v_{L3}$	$v_m$
ST0	0	0	0	0
ST1	$V_1 - N_1V_1$	$-N_1V_1$	$-N_1V_1$	$N_1V_1$
ST2	$V_1 - N_1V_1$ $-N_2V_2$	$V_2 - N_1V_1$ $-N_2V_2$	$-N_1V_1$ $-N_2V_2$	$N_1V_1$ $+N_2V_2$
ST3	$-N_2V_2$	$V_2 - N_2V_2$	$-N_2V_2$	$N_2V_2$
ST4	$-N_2V_2$ $-N_3V_3$	$V_2 - N_2V_2$ $-N_3V_3$	$V_3 - N_2V_2$ $-N_3V_3$	$N_2V_2$ $+N_3V_3$
ST5	$-N_3V_3$	$-N_3V_3$	$V_3 - N_3V_3$	$N_3V_3$
ST6	$V_1 - N_1V_1$ $-N_3V_3$	$-N_1V_1$ $-N_3V_3$	$V_3 - N_1V_1$ $-N_3V_3$	$N_1V_1$ $+N_3V_3$
ST7	$V_1 - N_1V_1$ $-N_2V_2$ $-N_3V_3$	$V_2 - N_1V_1$ $-N_2V_2$ $-N_3V_3$	$V_3 - N_1V_1$ $-N_2V_2$ $-N_3V_3$	$N_1V_1$ $+N_2V_2$ $+N_3V_3$

## کلیدزنی

با توجه به هشت حالت مختلف کلیدزنی مبدل، بدیهی است که هفت پارامتر کنترلی (دوره عملکرد حالت‌های کلیدزنی) در دسترس می‌باشد. از طرفی در یک مبدل سه پایانه‌ای، سه پارامتر کنترلی برای کنترل پایانه‌ها کافی می‌باشد. بنابراین برای سادگی می‌توان از چهار حالت صرف‌نظر نمود. با توجه به اهداف مختلف می‌توان این چهار حالت را انتخاب نمود. بر این اساس در این مقاله سه روش کلیدزنی ارائه شده است:

$$V_m = D_1 V_1 = D_3 V_2 = D_5 V_3 \quad (23)$$

با توجه به اینکه در هر یک از وضعیت‌های یک، سه و پنج تنها یکی از منابع در مدار قرار دارند (تنها یکی از کلیدهای SW11، SW21 و SW31 روشن هستند)، شکل‌های ۶ و ۷ نحوه پیاده‌سازی این روش کلیدزنی را نشان می‌دهد. همانند روش الف از سه سیگنال مرجع استفاده می‌گردد:

$$R_a = D_1 \quad (23)$$

$$R_b = D_1 + D_3 \quad (24)$$

$$R_c = D_1 + D_3 + D_5 \quad (25)$$

جاییکه:

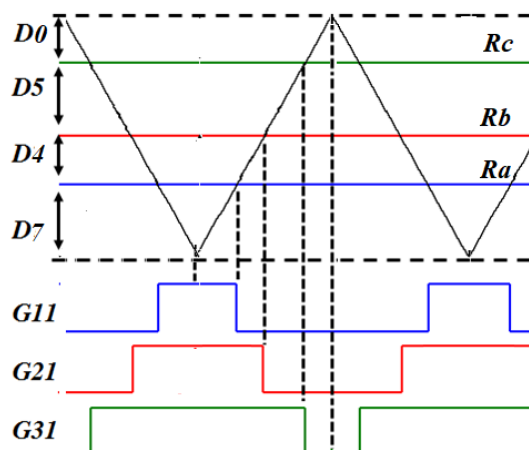
$$D_1 = V_{m-ref} / V_{1-ref} \quad (27)$$

$$D_3 = V_{m-ref} / V_{2-ref} \quad (28)$$

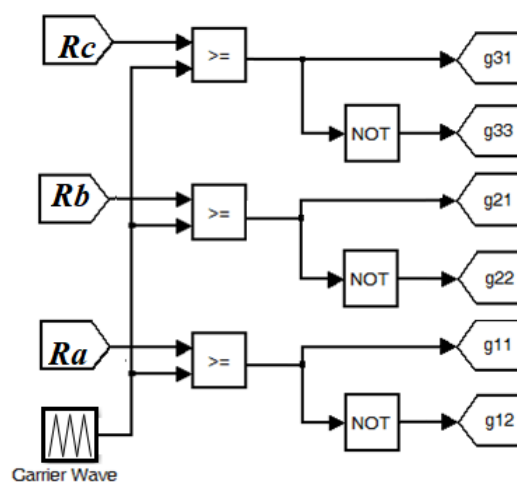
$$D_5 = V_{m-ref} / V_{3-ref} \quad (29)$$

با مقایسه سه سیگنال مرجع با یک موج حامل مقایسه می‌گردد. خروجی مقایسه‌کننده اول، سیگنال کلیدزنی G11 را می‌سازد. خروجی مقایسه‌کننده دوم با NOT خروجی مقایسه‌کننده اول، AND شده و سیگنال کلیدزنی G21 را تولید می‌کند. به طریق مشابه AND منطقی خروجی مقایسه‌کننده سوم با NOT خروجی مقایسه‌کننده دوم، سیگنال کلیدزنی G31 را تولید می‌کند. سیگنال‌های کلیدزنی G12، G22 و G32 به ترتیب از NOT سیگنال‌های G11، G21 و G31 حاصل می‌شوند. شکل ۷ نحوه پیاده‌سازی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است در این روش، شرط زیر باید رعایت گردد:

$$V_{m-ref} \leq 1 / (1/V_{3-ref} + 1/V_{2-ref} + 1/V_{1-ref}) \quad (30)$$



شکل ۴. روش پیشنهادی کلیدزنی مبتنی بر موج حامل الف



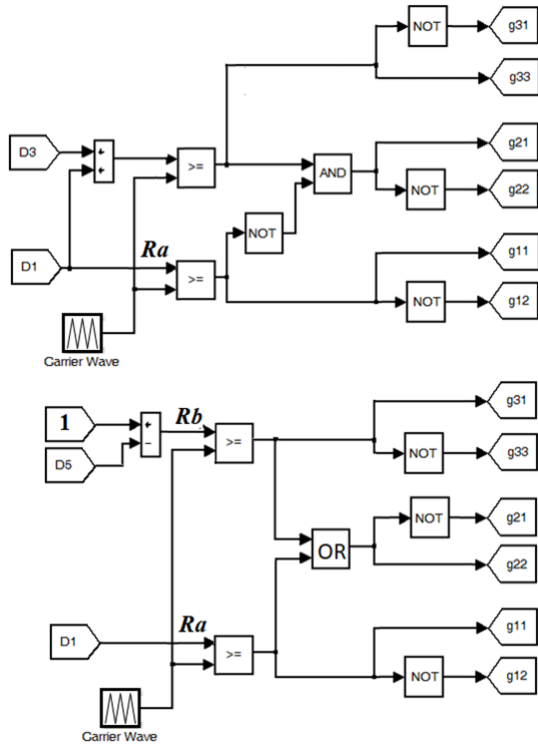
شکل ۵. پیاده‌سازی روش پیشنهادی کلیدزنی مبتنی بر موج حامل الف

(ب) در روش الف می‌توان مقدار مرجع برای متوسط ولتاژ نقطه میانی طبق رابطه زیر انتخاب نمود:

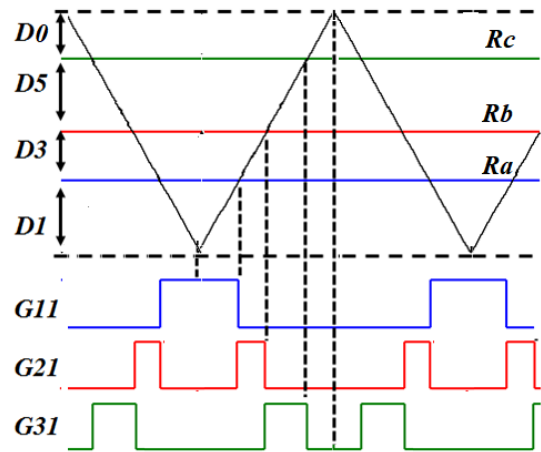
$$V_{m-ref} = \min(V_{1-ref}, V_{2-ref}, V_{3-ref}) \quad (22)$$

روش کلیدزنی مطرح شده در شکل‌های ۴ و ۵ برای این روش کلیدزنی نیز معتبر است. با در نظر گرفتن (۲۲) در این روش کلیدزنی، حالت کلیدزنی صفر حذف می‌گردد. همچنین کلید بالایی پایانه‌ای که کمترین مقدار مرجع را دارد، همواره روشن خواهد بود (و لذا کلید پایینی آن پایانه همواره خاموش می‌باشد). بنابراین اگر در یک کاربرد خاص، یک پایانه مشخص همواره کمترین مقدار مرجع ولتاژ را دارد می‌توان کلیدهای مربوط به آن پایانه را حذف نمود و آن پایانه را مستقیماً به سلف متناظر آن متصل نمود. در این صورت یکی از مقایسه‌کننده‌های شکل ۵ نیز حذف می‌شود.

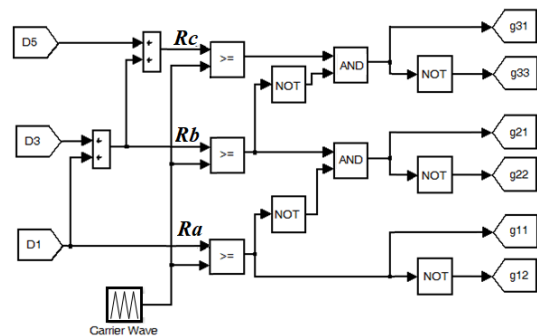
(ج) در این روش تنها از حالت‌های یک، سه، پنج و صفر از هشت ترکیب کلیدزنی استفاده می‌شود. در این صورت می‌توان نوشت:



شکل ۸. پیاده‌سازی روش پیشنهادی کلیدزنی مبتنی بر موج حامل د با دو الگوریتم مختلف



شکل ۶. روش پیشنهادی کلیدزنی مبتنی بر موج حامل ج



شکل ۷. پیاده‌سازی روش پیشنهادی کلیدزنی مبتنی بر موج حامل ج

## جریان سلف‌ها

### روش‌های کلیدزنی الف و ب:

اگر از روش کلیدزنی الف استفاده شود و در حالت  $\{ST7, ST4, ST5, ST0\}$  (بعنوان مثال) روابط زیر از (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) قابل استنتاج هستند:

$$I_{T1} = D_7 i_{L1, D7} \quad (33)$$

$$I_{T2} = D_4 i_{L2, D4} + D_7 i_{L1, D7} \quad (34)$$

$$I_{T3} = D_4 i_{L3, D4} + D_5 i_{L3, D5} + D_7 i_{L3, D7} \quad (35)$$

شکل ۹ شکل موج‌های جریان سلف‌ها را در سه حالت مختلف را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود در تمامی حالت‌ها متوسط جریان در دو مود کاری مشابه در دو سیکل متناوب برابر جریان متوسط سلف مربوطه است بطوریکه:

$$\frac{i_{Lk, D7} + i_{Lk, D7}''}{2} = \frac{i_{Lk, D4} + i_{Lk, D4}''}{2} = \frac{i_{Lk, D5} + i_{Lk, D5}''}{2} = \frac{i_{Lk, D0} + i_{Lk, D0}''}{2} = I_{Lk} \quad (36)$$

(د) در روش ج اگر دوره‌های وظیفه به گونه‌ای انتخاب شود که  $D_1 + D_3 + D_5 = 1$ ، حالت کلیدزنی صفر حذف می‌گردد در اینصورت مقدار مرجع ولتاژ نقطه میانی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_{m-ref} = 1 / (1/V_{3-ref} + 1/V_{2-ref} + 1/V_{3-ref}) \quad (31)$$

نحوه کلیدزنی شکل ۷ برای این روش پیشنهادی نیز معتبر است. لکن با توجه به اینکه سیگنال  $R_c$  در این روش همواره یک می‌باشد، می‌توان از روش‌های نشان داده شده در شکل ۸ نیز جهت کلیدزنی استفاده نمود که تنها از دو مقایسه‌کننده استفاده کرده‌اند. در این روش کلیدزنی، چنانچه شرط زیر برقرار باشد، ولتاژ نقطه میانی همواره ثابت می‌باشد و در وضعیت‌های کلیدزنی مختلف (اول، سوم و پنجم) تغییر نمی‌کند:

$$L_2 L_3 V_1 = L_1 L_3 V_2 = L_1 L_2 V_3 \quad (32)$$

$$I_{T2} = D_3 i_{L2, D3} \quad (45)$$

$$I_{T3} = D_5 i_{L3, D5} \quad (46)$$

شرایطی مشابه روش‌های کلیدزنی الف و ب، که با (۳۶) نشان داده شد، برای روش‌های کلیدزنی ج و د نیز صادق است، لذا می‌توان نوشت:  $I_{L1} = I_{T1}/D_1, I_{L2} = I_{T2}/D_3, I_{L3} = I_{T3}/D_5$  با در نظر گرفتن رابطه (۲۳)، به آسانی اثبات می‌گردد که رابطه (۴۰) برای روش‌های کلیدزنی ج و د نیز معتبر است. میزان ریپل جریان سلف‌ها بصورت زیر قابل محاسبه است:

$$\Delta I_{L1} = 2V_m (1 - N_1)/(L_1 f_s) \quad (47)$$

$$\Delta I_{L2} = \max\{2N_1 V_m/(L_2 f_s), 2N_3 V_m/(L_2 f_s)\} \quad (48)$$

$$\Delta I_{L3} = 2V_m (1 - N_3)/(L_3 f_s) \quad (49)$$

همانطور که مشاهده می‌شود رابطه ریپل جریان برای سلف دوم نسبت به دو سلف دیگر متفاوت است. چرا که برای سلف یک، حالت کلیدزنی اول در دو سیکل کلیدزنی متناوب در کنار هم قرار دارد. بصورت مشابه برای سلف سوم نیز حالت کلیدزنی پنجم در دو سیکل کلیدزنی متناوب در کنار هم قرار دارد. این در شرایطی است که حالت کلیدزنی سوم همواره بین حالت‌های اول و پنجم می‌باشد.

### مدل سیگنال کوچک

در این قسمت با فرض اینکه پایانه سوم به منبع ولتاژ ثابت و پایانه اول و دوم به بار مقاومتی موازی با یک خازن متصل شده‌اند (شکل ۱۰) و روش کلیدزنی د مورد استفاده قرار گرفته باشد، مدل سیگنال مبدل بدست می‌آید. در دوره اول معادلات حالت عبارتند از:

$$C_1 dv_1/dt = -v_1/R_{L1} - i_{L1} \quad (50)$$

$$C_2 dv_2/dt = -v_2/R_{L2} \quad (51)$$

$$L_1 di_1/dt = (1 - N_1)v_1 \quad (52)$$

$$L_2 di_2/dt = -N_1 v_1 \quad (53)$$

$$L_3 di_3/dt = -N_1 v_1 \quad (54)$$

جاییکه علامتهای ' و ' ' مشخص‌کننده دو سیکل کلیدزنی متناوب هستند با توجه به روابط (۳۳) الی (۳۶) می‌توان نوشت:

$$I_{L1} = I_{T1}/D_7 \quad (37)$$

$$I_{L2} = I_{T2}/(D_7 + D_4) \quad (38)$$

$$I_{L3} = I_{T3}/(D_7 + D_4 + D_5) \quad (39)$$

با توجه به (۱۸)، روابط فوق را به صورت زیر بیان کرد که برای همه مجموعه‌های کلیدزنی این روش کلیدزنی معتبر می‌باشد:

$$I_{Lk} = (I_{Tk} V_k)/V_m \quad k = 1, 2, 3 \quad (40)$$

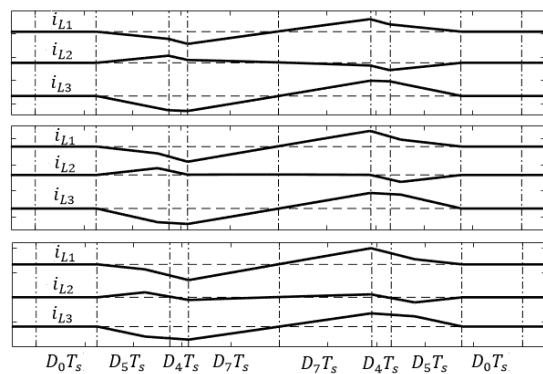
میزان ریپل جریان سلف پایانه‌های مختلف با استفاده از روابط زیر بدست می‌آید:

$$\Delta I_{Lu} = 2(V_m/V_u) (V_u - N_1 V_1 - N_2 V_2 - N_3 V_3)/(L_u f_s) \quad (41)$$

$$\Delta I_{Ln} = 2(V_m/V_l - V_m/V_n) (N_l V_l)/(L_n f_s) \quad (42)$$

$$\begin{cases} \Delta I_{Ll} = 2(V_m/V_u) (V_l - N_1 V_1 - N_2 V_2 - N_3 V_3)/(L_l f_s) \\ V_l > (N_n V_n + N_l V_l) \\ \Delta I_{Ll} = 2(V_m/V_l - V_m/V_n) (V_l - N_k V_l)/(L_l f_s) \\ V_l < (N_n V_n + N_l V_l) \end{cases} \quad (43)$$

جاییکه اندیس‌های  $l$  و  $u$  به ترتیب مربوط به پایانه‌های با بیشترین و کمترین ولتاژ و اندیس  $n$  مربوط به پایانه سوم می‌باشد.



شکل ۹. شکل موج جریان سلف‌ها در سه حالت مختلف الف)  $V_2 > (N_2 V_2 + N_3 V_3)$  ب)  $V_2 = (N_2 V_2 + N_3 V_3)$  ج)  $V_2 < (N_2 V_2 + N_3 V_3)$

### روش‌های کلیدزنی ج و د:

در این روش‌های کلیدزنی، روابط زیر از (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) قابل استنتاج هستند:

$$I_{T1} = D_1 i_{L1, D1} \quad (44)$$

معادلات حالت سیگنال کوچک به صورت زیر قابل بیان هستند:

$$C_1 d\hat{v}_1/dt = -\hat{v}_1/R_{L1} - D_1\hat{i}_{L1} - \hat{d}_1 I_{L1} \quad (65)$$

$$C_2 d\hat{v}_2/dt = -\hat{v}_2/R_{L2} - D_3\hat{i}_{L2} - \hat{d}_3 I_{L2} \quad (66)$$

$$L_1 d\hat{i}_1/dt = D_1(1 - N_1)\hat{v}_1 + (1 - N_1)V_1\hat{d}_1 - D_3N_2\hat{v}_2 - N_2V_2\hat{d}_3 - D_5N_3\hat{v}_3 - N_3V_3\hat{d}_5 \quad (67)$$

$$L_2 d\hat{i}_2/dt = -D_1N_1\hat{v}_1 - N_1V_1\hat{d}_1 + D_3(1 - N_2)\hat{v}_2 + (1 - N_2)V_2\hat{d}_3 - D_5N_3\hat{v}_3 - N_3V_3\hat{d}_5 \quad (68)$$

$$L_3 d\hat{i}_3/dt = -D_1N_1\hat{v}_1 - N_1V_1\hat{d}_1 - D_3N_2\hat{v}_2 - N_2V_2\hat{d}_3 + D_5(1 - N_3)\hat{v}_3 + (1 - N_3)V_3\hat{d}_5 \quad (69)$$

نمایش ماتریسی معادلات فوق با فرض  $D_5 = 1 - D_1 - D_3$  و  $\hat{d}_5 = -\hat{d}_1 - \hat{d}_3$  بصورت زیر می‌باشد:

$$\dot{X} = AX + BU \quad (70)$$

جاییکه

$$X = [\hat{v}_1 \quad \hat{v}_2 \quad \hat{i}_1 \quad \hat{i}_2 \quad \hat{i}_3]^T \quad (71)$$

$$U = [\hat{d}_1 \quad \hat{d}_3 \quad \hat{v}_3]^T \quad (72)$$

ماتریس‌های  $A$  و  $B$  به ترتیب مطابق روابط (۷۳) و (۷۴) می‌باشند. تابع انتقال سیستم به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$X = G(s)U = ((sI - A)^{-1}B)U = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \\ g_{41} & g_{42} & g_{43} \\ g_{51} & g_{52} & g_{44} \end{bmatrix} U \quad (75)$$

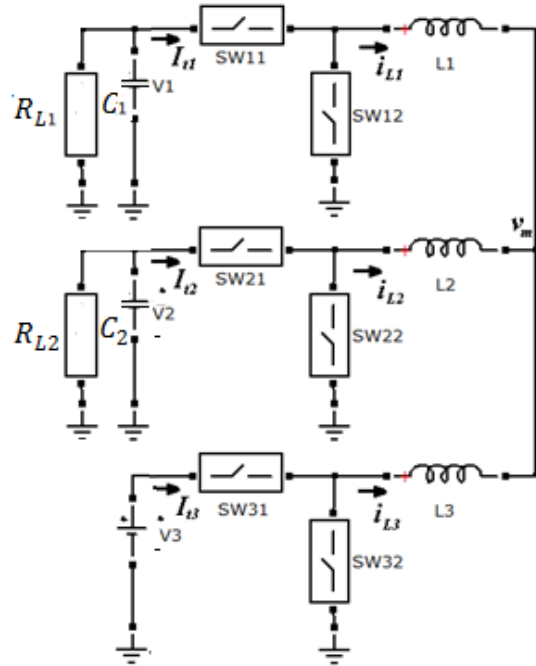
در این مقاله، فرض می‌شود کنترل ولتاژ پایانه‌های دوم و سوم مدنظر است لذا توابع انتقال مربوط به آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

$$g_{11}(s) = \frac{K_{11}(s+z_{11-1})(s+z_{11-2})(s+z_{11-3})}{(s+p_1)(s+p_2)(s+p_3)(s+p_3)} \quad (76)$$

$$g_{22}(s) = \frac{K_{22}(s+z_{22-1})(s+z_{22-2})(s+z_{22-3})}{(s+p_1)(s+p_2)(s+p_3)(s+p_3)} \quad (77)$$

$$g_{12}(s) = \frac{K_{12}(s+z_{12-1})(s+z_{12-2})}{(s+p_1)(s+p_2)(s+p_3)(s+p_3)} \quad (78)$$

$$g_{21}(s) = \frac{K_{21}(s+z_{21-1})(s+z_{21-2})}{(s+p_1)(s+p_2)(s+p_3)(s+p_3)} \quad (79)$$



شکل ۱۰. ساختار مبدل مورد استفاده جهت مدل‌سازی و شبیه‌سازی شامل دو بار RC و یک منبع ولتاژ ثابت

معادلات حالت در دوره سوم بصورت زیر قابل بیان هستند:

$$C_1 dv_1/dt = -v_1/R_{L1} \quad (85)$$

$$C_2 dv_2/dt = -v_2/R_{L2} - i_{L2} \quad (86)$$

$$L_1 di_1/dt = -N_2v_2 \quad (87)$$

$$L_2 di_2/dt = (1 - N_2)v_2 \quad (88)$$

$$L_3 di_3/dt = -N_2v_2 \quad (89)$$

معادلات حالت در دوره پنجم بصورت زیر قابل بیان هستند:

$$C_1 dv_1/dt = -v_1/R_{L1} \quad (90)$$

$$C_2 dv_2/dt = -v_2/R_{L2} \quad (91)$$

$$L_1 di_1/dt = -N_3v_3 \quad (92)$$

$$L_2 di_2/dt = -N_3v_3 \quad (93)$$

$$L_3 di_3/dt = (1 - N_3)v_3 \quad (94)$$

$$A = \begin{bmatrix} -1/(R_{L1}C_1) & 0 & -D_1/C_1 & 0 & 0 \\ 0 & -1/(R_{L2}C_2) & 0 & -D_3/C_2 & 0 \\ D_1(1-N_1)/L_1 & -D_3N_2/L_1 & 0 & 0 & 0 \\ -D_1N_1/L_2 & D_3(1-N_2)/L_2 & 0 & 0 & 0 \\ -D_1N_1/L_3 & -D_3N_2/L_3 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (73)$$

$$B = \begin{bmatrix} -I_{L1}/C_1 & 0 & 0 \\ 0 & -I_{L2}/C_2 & 0 \\ (V_1 - N_1V_1 + N_3V_3)/L_1 & (-N_2V_2 + N_3V_3)/L_1 & -(1 - D_1 - D_3)N_3/L_1 \\ (-N_1V_1 + N_3V_3)/L_2 & (V_2 - N_2V_2 + N_3V_3)/L_2 & -(1 - D_1 - D_3)N_3/L_2 \\ (-V_3 + N_3V_3 - N_1V_1)/L_3 & (-V_3 + N_3V_3 - N_2V_2)/L_3 & (1 - D_1 - D_3)(1 - N_3)/L_3 \end{bmatrix} \quad (74)$$

جدول ۴. پارامترهای توابع انتقال مبدل

مقدار	$\frac{y_i}{x_i}$	مقدار	$\frac{y_i}{x_i}$
-2041.2 + j4010.6	$p_3$	-1083.8 + j666.6	$p_1$
-2041.2 - j4010.6	$p_4$	-1083.8 - j666.6	$p_2$
183333	$k_{22}$	825000	$k_{11}$
9543.8	$z_{22-1}$	1346.3	$z_{11-1}$
-1053.3 + j1167.9	$z_{22-2}$	-2051.3 + j3908.1	$z_{11-2}$
-1053.3 - j1167.9	$z_{22-3}$	.1 - 2051.3 - j3908	$z_{11-3}$
436363636	$k_{12}$	-145454545	$k_{21}$
729.5	$z_{12-1}$	j7713.9	$z_{21-1}$
9062.9	$z_{12-2}$	-j7713.9	$z_{21-2}$

با توجه به شکل ۱۱ می توان نوشت:

$$v_1(s)/d'_1(s) = G_{f1}(s) = g_{11}(s)f_{11}(s) - g_{12}(s)f_{12}(s) \quad (84)$$

$$v_2(s)/d'_3(s) = G_{f2}(s) = g_{22}(s)f_{22}(s) - g_{21}(s)f_{21}(s) \quad (85)$$

برای مثال مطرح شده توابع فوق بصورت زیر می باشند:

$$G_{f1}(s) = \frac{K_{11}(s+z_{n1})(s+z_{n2})}{(s+z_{22-2})(s+z_{22-3})s} \quad (86)$$

$$G_{f2}(s) = \frac{K_{22}(s+z_{n1})(s+z_{n2})}{(s+z_{11-2})(s+z_{11-3})s} \quad (87)$$

جاییکه  $z_{n1} = 9468.6$  و  $z_{n2} = 1462.5$ . کنترل کننده های پیشنهادی بصورت زیر می باشند:

$$H_{c1}(s) = \frac{K_{h1}(s+z_c)(s+z_{22-2})(s+z_{22-3})}{(s+p_c)s} \quad (88)$$

$$H_{c2}(s) = \frac{K_{h2}(s+z_c)(s+z_{11-2})(s+z_{11-3})}{(s+p_c)s} \quad (89)$$

کنترل کننده ها به گونه ای طراحی می شوند که قطب های غیر صفر حذف شوند. با توجه به روابط فوق تابع انتقال حلقه بسته برای هر دو کنترل کننده بصورت زیر قابل بیان است:

$$T(s) = \frac{K_t(s-z_c)(s-z_{n1})(s-z_{n2})}{(s-p_c)s^2} = \frac{b_3s^3 + b_2s^2 + b_1s + 1}{a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + 1} \quad (90)$$

با توجه به پارامترهای جدول ۳، بهره، صفر و قطب توابع فوق در جدول ۴ مشخص شده است. همانطور که مشاهده می شود برخی از توابع فوق شامل صفر ناپایدار می باشند. شکل ۱۱ سیستم کنترل پیشنهادی را نشان می دهد. برای کنترل دو پایانه بصورت مستقل استفاده از یک شبکه جداکننده استفاده شده است. شبکه جداکننده به گونه ای طراحی شده که صفرهای ناپایدار توابع انتقال حذف نگردد (چرا که در اینصورت شبکه جداکننده حاوی قطب های ناپایدار خواهد بود [۱۶]).

$$f_{11}(s) = \frac{(s-z_{22-1})}{s} \quad (80)$$

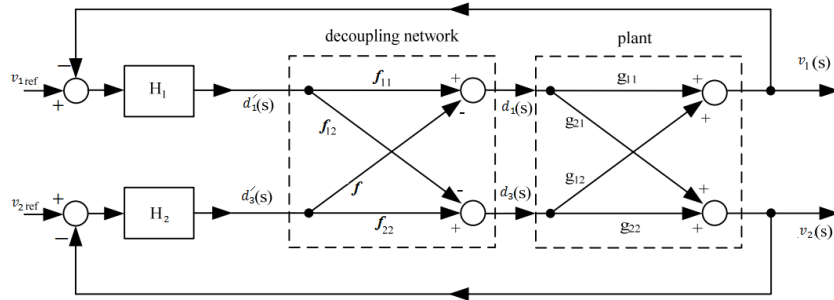
$$f_{22}(s) = \frac{(s-z_{11-1})}{s} \quad (81)$$

$$f_{12}(s) = \frac{K_{21}(s+z_{21-1})(s+z_{21-2})}{K_{22}(s+z_{22-2})(s+z_{22-3})} \quad (82)$$

$$f_{21}(s) = \frac{K_{12}(s+z_{12-1})(s+z_{12-2})}{K_{11}(s+z_{11-2})(s+z_{11-3})} \quad (83)$$

جدول ۳. پارامترهای مبدل جهت مدل سازی و شبیه سازی

واحد	مقدار	پارامتر	
پایانه اول	ولت	ولتاژ نامی	
	میکروفاراد	ظرفیت خازن	
	اهم	مقاومت بار	
پایانه دوم	ولت	ولتاژ نامی	
	میکروفاراد	ظرفیت خازن	
	اهم	مقاومت بار	
پایانه سوم	ولت	ولتاژ نامی	
مبدل	میلی هانری	L1	
	میلی هانری	L2	
	میلی هانری	L3	
	کیلو هرتز	فرکانس کلیدزنی	
	د	روش کلیدزنی	



شکل ۱۱. ساختار کنترلی پیشنهادی شامل شبکه جداکننده و کنترل‌کننده‌های مبتنی بر روش بهینه‌سازی دامنه

## شبیه‌سازی

شبیه‌سازی بر اساس ساختار شکل ۱۰ و پارامترهای جدول ۳ در نرم افزار MATLAB/Simulink انجام شده است. المان‌های استفاده در شبیه‌سازی بصورت ایده‌آل در نظر گرفته شده‌اند و از تلفات صرف‌نظر شده است. جدول ۴ سناریوهای مختلف شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. در چهار سناریوی اول، برای سیستم حلقه باز شبیه‌سازی با چهار روش کلیدزنی انجام می‌شود. در سناریوی پنجم امکان تثبیت ولتاژ میانی با استفاده از سلف‌های متفاوت بررسی می‌گردد. در سناریوهای ششم و هفتم مدل و روش کنترل پیشنهادی بررسی می‌گردد.

برای روش کلیدزنی الف، ولتاژ مرجع برای نقطه میانی برابر ۲۰ ولت در نظر گرفته شد. شکل ۱۳ نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود ولتاژ پایانه‌های اول و دوم ترتیب ۷۲ و ۲۴ ولت می‌باشد. با توجه به مقادیر مرجع جدول ۳، مجموعه  $\{ST7, ST4, ST3, ST0\}$  به مبدل اعمال خواهد شد، لذا ولتاژ نقطه میانی در دوره‌های مختلف با توجه به جدول ۳، برابر با ۴۸، ۲۴، ۸ و صفر ولت با متوسط ۲۰ ولت می‌باشد. با توجه به (۴۰)، جریان متوسط سلف‌های اول، دوم و سوم به ترتیب برابر ۵،۴، -۱،۲ و ۶،۶ آمپر می‌باشد. برای روش کلیدزنی ب، ولتاژ مرجع برای نقطه میانی با توجه به (۲۲) برابر ۲۴ ولت در نظر گرفته می‌شود. شکل ۱۴ نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در این حالت ولتاژ پایانه‌های اول و دوم ترتیب ۷۲ و ۲۴ ولت می‌باشد. در این روش مجموعه  $\{ST7, ST4, ST3\}$  به مبدل اعمال خواهد شد، لذا ولتاژ نقطه میانی در دوره‌های مختلف برابر با ۴۸، ۲۴ و ۸ ولت می‌باشد. همچنین با توجه به (۵۳)، جریان متوسط سلف‌های اول، دوم و سوم به ترتیب برابر ۴،۵، -۱،۰ و ۵،۵ آمپر می‌باشد. برای روش کلیدزنی ج، ولتاژ مرجع برای نقطه میانی برابر ۱۰ ولت در نظر گرفته شد. شکل ۱۵ نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. با توجه اعمال مجموعه  $\{ST1, ST3, ST5, ST0\}$  به مبدل، ولتاژ نقطه میانی در دوره‌های مختلف با توجه به جدول ۲، برابر با ۲۴، ۸،

جاییکه

$$K_t = K_{h1}K_{11} = K_{h2}K_{22} \quad (۹۱-الف)$$

$$b_3 = \frac{1}{-z_c z_{n1} z_{n2}} \quad (۹۱-ب)$$

$$b_2 = \frac{z_c + z_{n1} + z_{n2}}{z_c z_{n1} z_{n2}} \quad (۹۱-ج)$$

$$b_1 = \frac{z_c z_{n1} + z_c z_{n2} + z_{n1} z_{n2}}{-z_c z_{n1} z_{n2}} \quad (۹۱-د)$$

$$a_3 = \frac{1 + K_t}{-K_t z_c z_{n1} z_{n2}} \quad (۹۱-ه)$$

$$a_2 = \frac{p_c + K_t(z_c + z_{n1} + z_{n2})}{K_t z_c z_{n1} z_{n2}} \quad (۹۱-و)$$

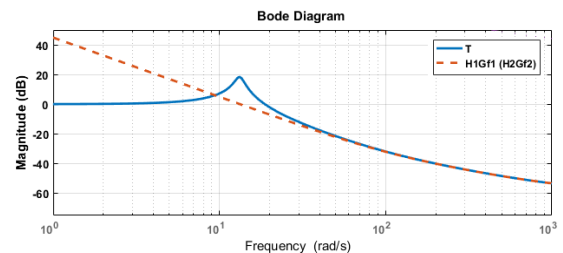
$$a_1 = \frac{z_c z_{n1} + z_c z_{n2} + z_{n1} z_{n2}}{-z_c z_{n1} z_{n2}} \quad (۹۱-ز)$$

با استفاده از روش بهینه‌سازی دامنه برای طراحی کنترل‌کننده‌ها، بهره، و صفر و قطب توابع کنترل‌کننده باید به گونه‌ای انتخاب شوند که شرایط زیر برقرار باشد [۱۷]:

$$a_1^2 - 2a_2 = 0 \quad (۹۲-الف)$$

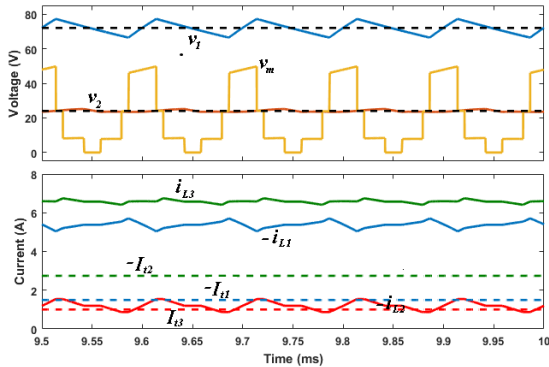
$$a_2^2 - 2a_1 a_3 = 0 \quad (۹۲-ب)$$

برای مثال مطرح شده مقادیر  $z_c = -300$ ،  $p_c = -14851$  و  $K_t = 0.1325$  در نظر گرفته شده است که شروط فوق را رعایت می‌کند. شکل ۱۲ نمودار تابع انتقال حلقه بسته را نشان می‌دهد.

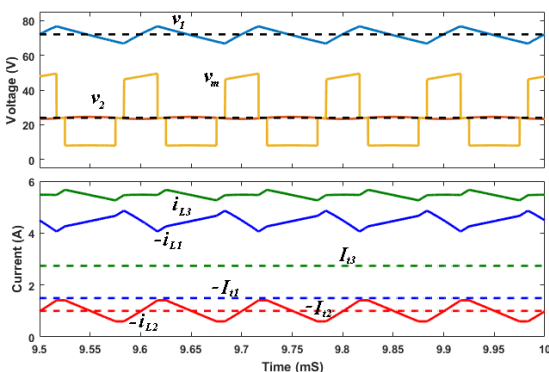


شکل ۱۲: نمودار بود تابع انتقال حلقه بسته برای مبدل بر اساس پارامترهای

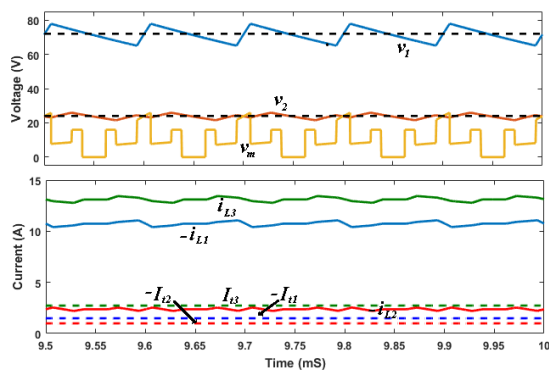
جدول ۳



شکل ۱۳: نتایج شبیه‌سازی برای روش کلیدزنی الف: ولتاژهای پایانه‌های اول، دوم، و نقطه میانی (نمودار بالا)، جریان‌های سلف‌های اول، دوم و سوم، و متوسط جریان‌های پایانه‌های اول، دوم و سوم (نمودار پایین)



شکل ۱۴: نتایج شبیه‌سازی برای روش کلیدزنی ب: ولتاژهای پایانه‌های اول، دوم و نقطه میانی (نمودار بالا)، جریان‌های سلف‌های اول، دوم و سوم، و متوسط جریان‌های پایانه‌های اول، دوم و سوم (نمودار پایین)



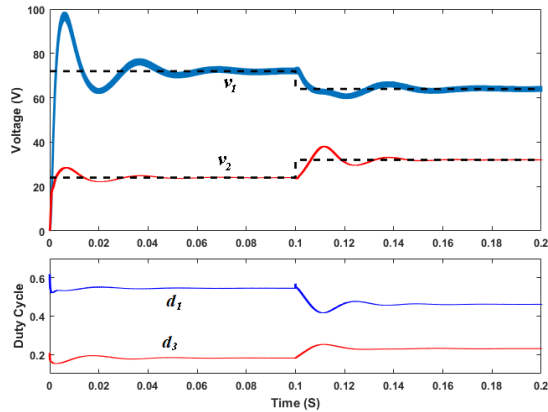
شکل ۱۵: نتایج شبیه‌سازی برای روش کلیدزنی ج: ولتاژهای پایانه‌های اول، دوم و نقطه میانی (نمودار بالا)، جریان‌های سلف‌های اول، دوم و سوم، و متوسط جریان‌های پایانه‌های اول، دوم و سوم (نمودار پایین)

۱۶ و صفر ولت می‌باشد. با توجه به (۴۰)، جریان متوسط سلف‌های اول، دوم و سوم به ترتیب برابر  $10.8$ ،  $-2.4$  و  $13.2$  آمپر می‌باشد. شکل ۱۶ نتایج شبیه‌سازی برای روش کلیدزنی د را نشان می‌دهد. ولتاژ مرجع برای نقطه میانی با توجه به (۳۱) برابر  $13.091$  ولت در نظر گرفته می‌شود و ولتاژ نقطه میانی در دوره‌های مختلف با توجه به جدول ۲، برابر با  $8$  و  $16$  ولت می‌باشد. با توجه به (۴۰)، جریان متوسط سلف‌های اول، دوم و سوم به ترتیب برابر  $10.8$ ،  $-1.83$  و  $8.25$  آمپر می‌باشد. در شبیه‌سازی دیگری با روش کلیدزنی د، مقادیر سلف‌ها طبق (۳۲) انتخاب شد تا ولتاژ نقطه میانی در دوره‌های مختلف کلیدزنی بدون تغییر بماند. بر این اساس مقادیر سلف‌ها بصورت  $L_3 = 1.5mH$ ،  $L_2 = 0.5mH$ ،  $L_3 = 1mH$  انتخاب گردید. نتیجه شبیه‌سازی در این حالت در شکل ۱۷ نمایش داده شده است که مشاهده می‌شود ولتاژ نقطه میانی تقریباً در ولتاژ مورد انتظار  $13.091$  ولت تثبیت شده است.

در قسمت دوم شبیه‌سازی به بررسی مدل و سیستم کنترل طراحی شده برای روش د پرداخته می‌شود. جهت بررسی مدل استخراج شده در بخش ۵ در لحظه  $0.015$  ثانیه به میزان  $0.02$  به  $D_1$  اضافه گردید و در لحظه  $0.015$  به میزان  $0.02$  از  $D_3$  کم گردید. شکل ۱۸ نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل الکترونیک قدرت و مدل تابع تبدیل را نشان می‌دهد که همانطور که مشاهده می‌شود تابع تبدیل به خوبی خروجی مدل الکترونیک قدرت را دنبال کرده است. در آخرین شبیه‌سازی، با استفاده از کنترل-کننده‌های طراحی شده در بخش ۵، خروجی‌های مدل بصورت حلقه بسته کنترل شد. شکل ۱۹، ولتاژهای خروجی به همراه مقادیر مرجع نشان داده شده است. مشاهده می‌شود مقادیر مرجع به خوبی دنبال می‌شوند و همچنین دوره‌های وظیفه بعنوان خروجی کنترل‌کننده‌ها در شکل ۱۹ نشان داده شده است که مشاهده می‌شود که دارای تغییرات نرم می‌باشند.

جدول ۴. سناریوهای شبیه‌سازی

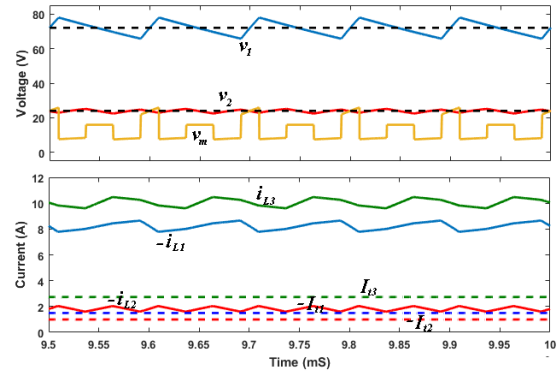
ردیف	کنترل	روش کلیدزنی	توضیحات
۱	حلقه باز	الف	بررسی روش کلیدزنی
۲	حلقه باز	ب	بررسی روش کلیدزنی
۳	حلقه باز	ج	بررسی روش کلیدزنی
۴	حلقه باز	د	بررسی روش کلیدزنی
۵	حلقه باز	د	سلف‌های متفاوت برای تثبیت ولتاژ میانی
۶	حلقه باز	د	بررسی مدل با ایجاد اغتشاش
۷	حلقه بسته	د	بررسی پاسخ سیستم



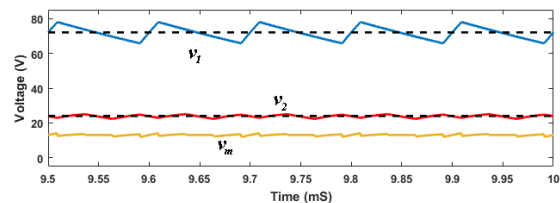
شکل ۱۹. نتایج شبیه‌سازی کنترل حلقه بسته: ولتاژهای پایانه‌های اول و دوم (نمودار بالا)، دوره‌های وظیفه (نمودار پایین)

### نتیجه گیری

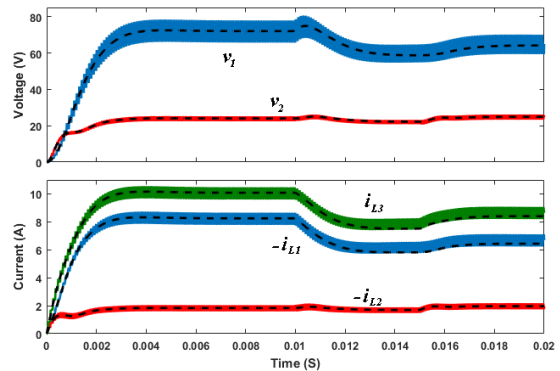
در این مقاله مدار معادل یک مبدل سه پایانه‌ای بدون خازن در هشت حالت کلیدزنی مختلف ممکن (نامگذاری شده از صفر تا هفت) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. بر اساس تحلیل صورت گرفته چهار روش کلیدزنی مختلف برای این مبدل ارائه شد. روش اول با توجه سطح ولتاژ پایانه‌ها نسبت به هم، از چهار حالت کلیدزنی مختلف استفاده می‌کند (حالت‌های صفر و هفت همواره استفاده می‌شوند). روش کلیدزنی دوم شبیه روش اول می‌باشد که با حذف حالت کلیدزنی صفر از سه حالت کلیدزنی مختلف استفاده می‌کند. تعداد کلیدزنی روش‌های دوم و اول به ترتیب کمترین تعداد در بین چهار روش پیشنهادی است. در روش سوم از حالت‌های کلیدزنی صفر، یک، سه و پنج استفاده می‌شود بطوریکه حالت‌های یک، سه و پنج بصورت مستقل پایانه‌ها را کنترل می‌نمایند. روش چهارم شبیه روش سوم است که با حذف حالت صفر از حالت‌های یک، سه و پنج سود می‌برد در این روش با استفاده از سلف‌های متفاوت برای پایانه‌های مختلف می‌توان ولتاژ نقطه میانی را تثبیت نمود. لازم به ذکر است در روش‌های دوم و چهارم تنها دو متغیر کنترلی وجود دارد در حالیکه دو روش دیگر دارای سه متغیر کنترلی می‌باشند. جهت طراحی کنترل‌کننده، مدل سیگنال کوچک با در نظر گرفتن روش کلیدزنی چهارم استخراج شد. با توجه به مدل هر دو خروجی مشاهده شد که هر دو متغیر کنترلی وابسته هستند و همچنین دارای صفرهای ناپایدار می‌باشند. لذا یک روش جدید جهت جداسازی مسیر کنترل دو خروجی بدون استفاده از قطب ناپایدار (برای حذف صفرهای ناپایدار) ارائه شد. برای سیستم جداسازی حاصله بر اساس روش بهینه‌سازی دامنه کنترل‌کننده حلقه بسته طراحی گردید. در نهایت مبدل شبیه‌سازی شد که نتایج شبیه‌سازی صحت و کارایی تحلیل‌ها و روش‌های پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶. نتایج شبیه‌سازی برای روش کلیدزنی د: ولتاژهای پایانه‌های اول، دوم و نقطه میانی (نمودار بالا)، جریان‌های سلف‌های اول، دوم و سوم، و متوسط جریان‌های پایانه‌های اول، دوم و سوم (نمودار پایین)



شکل ۱۷. نتایج شبیه‌سازی برای روش کلیدزنی د و استفاده از سلف‌های متفاوت جهت تثبیت ولتاژ نقطه میانی: ولتاژهای پایانه‌های اول، دوم، و نقطه میانی



شکل ۱۸. مقایسه نتایج شبیه‌سازی مدل الکترونیک قدرت و مدل تابع تبدیل: ولتاژهای پایانه‌های اول، دوم و نقطه میانی (نمودار بالا)، جریان‌های سلف‌های اول، دوم و سوم، و متوسط جریان‌های پایانه‌های اول، دوم و سوم (نمودار پایین) (منحنی‌های خط چین مربوط به مدل تابع تبدیل می‌باشند)

مراجع

- [10] N. Katayama, and S. Kogoshi, "Frequency characteristic of a fuel cell/EDLC hybrid power source system with a multi-port bidirectional dc-dc converter," IEEE International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE ECCE), Jeju, Korea , 2011, pp. 2561–2564.
- [11] B. Zhao, Q. Yu and W. Sun, "Extended-Phase-Shift Control of Isolated Bi-directional DC-DC Converter for Power Distribution in Microgrid," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 11, pp. 4667–4680, 2012.
- [12] H. Wu, R. Chen, J. Zhang, Y. Xing, H. Hu and H. Ge, "A family of Three-Port Half-Bridge Converters for a Stand-Alone Renewable Power System," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 9, pp. 2697-2706, 2011.
- [13] H. Wu, K. Sun, S. Ding and Y Xing. "Topology Derivation of Nonisolated Three-Port DC–DC Converters From DIC and DOC," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 7, pp. 3297–3307, 2013
- [14] Junjun Zhang, Hongfei Wu, Jun Huang, Yan Xing, Xudong Ma, "A Novel Multi-Port Bidirectional Converter for Interfacing Distributed DC Micro-Grid," IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Istanbul, Turkey, 2014.
- [15] S.M. Dehghan, M. Alinaghizadeh Ardestani, Solar Charger System With LED Driver Using Capacitor-Less Multi-Port Converter," 7th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC 2016) 16-18 Feb. 2016, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
- [16] Zhijun Qian, *Modeling And Design Of Multi-port Dc/DC Converters*, PhD Thesis, University of Central Florida, 2010
- [17] J.W. Umland, M. Safiuddin, " Magnitude and symmetric optimum criterion for the design of linear control systems: what is it and how does it compare with the others?," : IEEE Transactions on Industry Applications, Volume: 26, Issue: 3, May/June 1990 , pp. 489 – 497, DOI: 10.1109/28.55967
- [1] Jianwu Zeng, Wei Qiao, and Liyan Qu, "Modeling and Control of a Three-Port DC-DC Converter for PV-Battery Systems," Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2015 , Page(s): 1768 – 1773, DOI: 10.1109/APEC.2015.7104586.
- [2] H. Wu, R. Chen, J. Zhang, Y. Xing, H. Hu, and H. Ge, "A family of three-port half-bridge converters for a stand-alone renewable power system," IEEE Trans. Power Electron., vol. 26, no. 9, pp. 2697-2706, Sept. 2011
- [3] JP Benner, "Photovoltaics gaining greater visibility", IEEE Spectrum, Vol.36, Issue 9, Sep.1999 ,pp. 34-42 .
- [4] DE Carlson, "Recent Advances in Photovoltaics," Proceedings of the Intersociety Engineering Conference on Energy Conversion, 1995.
- [5] Ibrahim, O.; Yahaya, N.Z.; Saad, N., "Single phase inverter with wideinput voltage range for solar photovoltaic application," IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Italy, Rome, 2015.
- [6] J.M. Ho, & C.C. Lou, "The Design and Implementation of Stand-Alone Solar Power LED Lighting Systems," Recent Researches in Circuits, Systems, Electronics, Control & Signal Processing, Athens, Greece, pp. 66-69, 2011.
- [7] A. Wechsler, B. C. Mecrow, D. J. Atkinson, et al. "Condition monitoring of DC-Link capacitors in aerospace drives," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 48, no. 6, pp. 1866-1874, 2012.
- [8] Li W, Xiao J, Zhao Y, He X, "PWM plus phase angle shift (PPAS) control scheme for combined multiport DC-DC converters," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 3, pp. 1479-1489, 2012.
- [9] L. Wang , Z. Wang and H. Li., "Asymmetrical duty cycle control and decoupled power flow design of a three-port bidirectional DC-DC converter for fuel cell vehicle application," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 2, pp. 891 -904, 2012.