

## ارائه روش سوئیچینگ Carrier-Based اینورتر نه سوئیچه منبع امپدانس

مهدی عزیزی<sup>۱</sup>، علیرضا فاطمی<sup>۲</sup> و دکتر مصطفی محمدیان<sup>۳</sup>

آزمایشگاه الکترونیک قدرت و حفاظت، دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس

azizimahdi2003@yahoo.com<sup>۱</sup>

alireza.fatemi@gmail.com<sup>۲</sup>

mohamadian@modares.ac.ir<sup>۳</sup>

چکیده - در این مقاله یک روش سوئیچینگ Carrier-Based جدید برای اینورتر نه سوئیچه Z-source پیشنهاد شده است. اینورتر نه سوئیچه Z-source با افزودن شبکه‌ی امپدانس به اینورتر نه سوئیچه حاصل می‌شود. این آرایش دارای قابلیت Boost ولتاژ است و همچنین نسبت به اینورتر نه سوئیچه قابلیت اطمینان بیشتری دارد. روش‌های سوئیچینگ SVM که در تحقیقات قبلی برای این آرایش ارائه شده اند، پیچیده بوده و همچنین پیاده سازی آنها مشکل است. روش سوئیچینگ پیشنهادی علاوه بر حفظ تمامی ویژگیهای اینورتر نه سوئیچه منبع امپدانس نسبت به روشهای موجود ساده تر می‌باشد. کلید واژه- اینورتر نه سوئیچه، اینورتر Z-source.

است. این آرایش در [۵] معرفی شده و یک روش سوئیچینگ نیز برای آن ارائه گردیده است. در این مقاله یک روش سوئیچینگ Carrier-Based برای اینورتر نه سوئیچه‌ی منبع امپدانس پیشنهاد می‌گردد که نسبت به روشی که در [۵] معرفی شده است ساده تر بوده و تمام کارکردهای این آرایش را حفظ می‌کند.

این مقاله در چهار بخش ارائه می‌شود:

در بخش دوم اینورتر نه سوئیچه و روش Carrier-Based سوئیچینگ آن بررسی می‌شود. در قسمت سوم اصول عملکرد اینورتر Z-source ارائه شده و نیز روش سوئیچینگ پیشنهاد شده در [۴] برای اینورتر Z-source سه فاز سه ساق بررسی می‌گردد. در بخش چهارم روش سوئیچینگ Carrier-based مربوط به اینورتر نه سوئیچه‌ی Z-Source تشریح خواهد شد. سرانجام در بخش پنجم نتایج شبیه سازیها که تایید کننده‌ی مباحث نظری است آورده می‌شود.

### ۲. اینورتر نه سوئیچه

آرایش اینورتر نه سوئیچه در شکل (۱) نشان داده شده

اینورتر نه سوئیچه‌ی Z-source یک اینورتر Buck-Boost است.

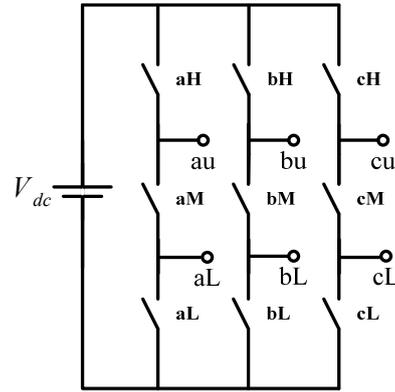
### ۱. مقدمه

اخیرا تغذیه و کنترل مستقل دو بار با استفاده از یک اینورتر مورد توجه قرار گرفته است. این کار مزایایی از قبیل کاهش هزینه، کاهش فضای اشغال شده و نیز کاهش تلفات سوئیچینگ را در پی دارد [۱]. اینورتر نه سوئیچه آرایشی است که به این منظور پیشنهاد شده است. این اینورتر متشکل از سه ساق است که در هر ساق سه سوئیچ وجود دارد [۲].

اینورتر نه سوئیچه معمولی یک اینورتر Buck می‌باشد. این اینورتر با مشکل خطر وقوع اتصال کوتاه در باس DC مواجه است. dead-time لحاظ شده میان خاموش شدن یکی از سوئیچ های ساق و روشن شدن سوئیچ دیگر همان ساق برای مقابله با خطر اتصال کوتاه شدن باس DC موجب ایجاد اعوجاج در شکل موج خروجی می‌گردد [۳].

با استفاده از شبکه‌ی امپدانس مشکلات فوق الذکر مرتفع می‌گردند. اینورتر Z-source مشکلی از نظر وقوع اتصال کوتاه در باس dc ندارد و تمام سوئیچ های یک ساق می‌توانند همزمان روشن شوند [۴].

در این روش سوئیچینگ شکل موج مرجع خروجی پایینی با بخش پایینی سیگنال حامل مقایسه می شود. شکل (۲) بلوک دیاگرام این روش را به نمایش می گذارد.



شکل ۱: اینورتر نه سوئیچه [۲]

### ۳. اینورتر Z-source سه فاز سه ساق

ساختمان اینورتر Z-source سه فاز سه ساق در شکل (۳) نشان داده شده است. اینورتر Z-source دو وضعیت کاری دارد [۶]:

۱- خروجی شبکه‌ی امیدانسی اتصال کوتاه شده است. (Shoot-through state)

۲- خروجی شبکه‌ی امیدانسی به بار متصل است. (Non-shoot-through state)

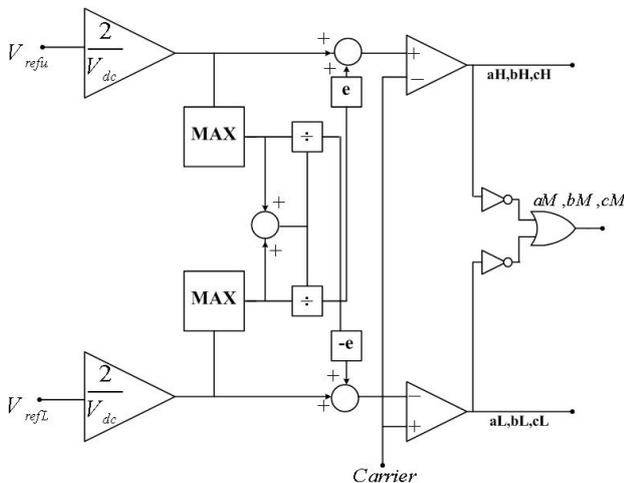
در صورتی که  $c_1 = c_2$  و  $L_1 = L_2$  باشد و  $T_0$  طول دوره‌ی اتصال کوتاه شدن خروجی شبکه‌ی Z-source و  $T$  پریود سوئیچینگ باشد، رابطه‌ی ولتاژ خروجی و ورودی شبکه‌ی Z-source به شکل زیر خواهد بود:

$$\bar{v}_i = \frac{1}{1 - 2\frac{T_0}{T}} V_{dc} = BV_{dc} \quad B \geq 1 \quad (3)$$

B را ضریب تقویت می‌نامند. ماکزیمم دامنه‌ی ولتاژ فاز خروجی به صورت (۴) می‌شود:

$$\hat{v}_o = M \frac{\bar{v}_i}{2} = MB \frac{V_{dc}}{2} \quad (4)$$

با توجه به آن که  $B \geq 1$  است دامنه‌ی ولتاژ فاز خروجی می‌تواند بزرگتر از اینورترهای معمولی باشد.



شکل ۲: بلوک دیاگرام کنترل اینورتر نه سوئیچه [۲]

در [۲] روشی برای سوئیچینگ اینورتر نه سوئیچه ارائه شده است. در این روش یک ولتاژ افست متغیر به شکل موج مرجع ولتاژ فاز خروجی های بالایی و پایینی اینورتر نه سوئیچه افزوده می شود.

پارامتر  $\alpha$  که نرخ ضریب توزیع نامیده شده است به صورت زیر تعریف می شود:

$$\alpha = \frac{|r_1|}{|r_1| + |r_2|} \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (1)$$

در رابطه‌ی بالا:

$$r_1 = \max(V_{refau}, V_{refbu}, V_{refcu})$$

$$r_2 = \max(V_{refal}, V_{refbl}, V_{refcl})$$

$V_{refji} \ (i=u,L \ j=a,b,c)$  ولتاژ مرجع فاز خروجی های بالایی و

پایینی اینورتر نه سوئیچه است که u نشان دهنده‌ی خروجی بالایی و L نشان دهنده‌ی خروجی پایینی است.

در این روش از عبارت  $(1 - \alpha)$  به عنوان افست شکل موج مرجع ولتاژ های فاز خروجی بالایی و  $(-\alpha)$  به عنوان افست شکل موجهای مرجع ولتاژهای فاز خروجی پایینی استفاده می شود. اندیس مدولاسیون در این روش به صورت (۲) است:

$$m_u = \frac{V_{refu}}{V_{dc}/2} + (1 - \alpha)e$$

$$m_L = \frac{V_{refL}}{V_{dc}/2} + (-\alpha)e \quad (2)$$

پارامترهای به کار رفته در رابطه‌ی (۲) عبارتند از:

$$V_{refi} = [V_{refai} \ V_{refbi} \ V_{refci}]^T$$

$$m_i = [m_{ai} \ m_{bi} \ m_{ci}]$$

$$i = u, L$$

$$e = [1 \ 1 \ 1]^T$$

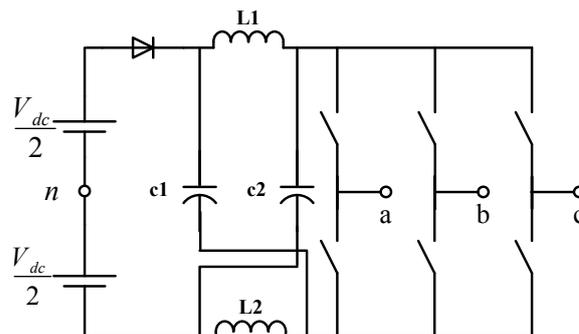
#### ۴. اینورتر نه سوئیچه‌ی Z-Source و روش پیشنهادی

##### سوئیچینگ Carrier-Based آن

اینورتر نه سوئیچه‌ی Z-source، در شکل (۴) نشان داده شده است.

این آرایش یک اینورتر Buck-Boost است و توانایی افزایش ولتاژ باس DC را بدون استفاده از مبدل اضافه برای Boost کردن ولتاژ دارد. همچنین به علت مجاز بودن وقوع اتصال کوتاه نسبت به نوع بدون شبکه‌ی امیدانسی از قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار است.

روش سوئیچینگ که برای اینورتر نه سوئیچه Z-source پیشنهاد می‌شود از تلفیق روش سوئیچینگ اینورتر نه سوئیچه و روش سوئیچینگ پیشنهاد شده در [۴] برای اینورتر Z-source سه فاز به دست آمده است. اینورتر نه سوئیچه‌ی Z-Source همانند اینورتر نه سوئیچه‌ی معمولی به سبب داشتن دو خروجی نیاز به دو مجموعه ولتاژ مرجع، یکی برای خروجی بالایی و دیگری برای خروجی پایینی، دارد. در روش سوئیچینگ پیشنهادی مراحل زیر به صورت مستقل بر روی هر کدام از مجموعه‌های ولتاژ مرجع انجام می‌گیرد. در مرحله اول با استفاده از رابطه‌ی (۶) نسبت ولتاژ مرجع پله‌های اینورتر با یکدیگر مشخص می‌شود. در ادامه با توجه به رابطه‌ی (۵) میزان افست‌های متناسب با ضریب تقویت مورد نظر به ولتاژهای ماکزیمم، مینیمم و متوسط، تعیین شده توسط رابطه‌ی (۶) افزوده می‌شود. البته در این قسمت باید رابطه‌ی (۵) برای سازگاری با اینورتر نه سوئیچه‌ی Z-Source اصلاح شود.



شکل ۳: اینورتر شبکه امیدانسی [۴]

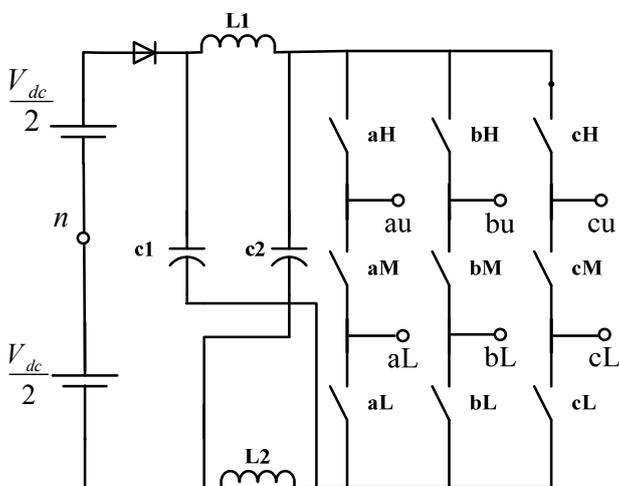
در [۴] یک روش سوئیچینگ Carrier-Based برای اینورتر Z-source سه فاز سه ساق پیشنهاد شده است. در این روش برای تولید سیگنال گیت سوئیچهای هر ساق از دو موج مرجع استفاده می‌شود (یکی برای سوئیچ بالایی ساق و دیگری برای سوئیچ پایینی). بنابراین برای اینورتر سه فاز سه ساق شش موج مرجع مورد نیاز است. در این روش با توجه به رابطه‌ی شکل موجهای مرجع ولتاژهای پل اینورتر سه فاز سه ساق با هم به هر کدام از آنها دو مقدار افست افزوده می‌شود. این مقدار افست متناسب با مدت زمان ایجاد اتصال کوتاه توسط آن ساق است. در این روش مدت زمان ایجاد اتصال کوتاه توسط ساقها برابر است.

$$\begin{aligned}
 V_{\max}(SX) &= V_{\max} + \frac{T0}{T} \\
 V_{\max}(SY) &= V_{\max} + \frac{T0}{3T} \\
 V_{\text{mid}}(SX) &= V_{\text{mid}} + \frac{T0}{3T} \\
 V_{\text{mid}}(SY) &= V_{\text{mid}} - \frac{T0}{3T} \\
 V_{\min}(SX) &= V_{\min} - \frac{T0}{3T} \\
 V_{\min}(SY) &= V_{\min} - \frac{T0}{T}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

در رابطه‌ی (۵)،  $X$  نشان دهنده‌ی سوئیچ بالایی و  $Y$  نشان دهنده‌ی سوئیچ پایینی هر ساق است همچنین:

$$\begin{aligned}
 V_{\max} &= \max(V_{an}^*, V_{bn}^*, V_{cn}^*) \\
 V_{\min} &= \min(V_{an}^*, V_{bn}^*, V_{cn}^*) \\
 V_{\text{mid}} &= \text{mid}(V_{an}^*, V_{bn}^*, V_{cn}^*)
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

$T$  برابر نصف پریود شکل موج حامل اینورتر است. سیگنال گیت سوئیچهای پایینی از NOT مقایسه مرجع این سوئیچها با شکل موج حامل به دست می‌آید.



شکل ۴: اینورتر نه سوئیچه Z-source [۵]

در مرحله‌ی دوم با استفاده از رابطه‌ی (۱) و با توجه به مجموعه ولتاژ مرجع هریک از خروجی‌های اینورتر ضریب  $\alpha$  محاسبه شده و دو مقدار افست  $(1 - \alpha)$  و  $(-\alpha)$  تعیین می‌شوند. سپس افست  $(1 - \alpha)$  به مجموعه ولتاژ خروجی بالایی حاصل از مرحله‌ی قبل و افست  $(-\alpha)$  به مجموعه ولتاژ خروجی پایینی به دست آمده از مرحله‌ی قبل افزوده می‌شوند. شکل (۶) بلوک دیاگرام روش سوئیچینگ پیشنهادی را به نمایش می‌گذارد.

در شکل (۶) یک افست مطابق رابطه زیر که در [۷] پیشنهاد شده است به مراجع سینوسی افزوده شده است تا PWM سینوسی به SVM تبدیل شود:

$$V_{fn} = -\frac{V_{\max} + V_{\min}}{2} \quad (8)$$

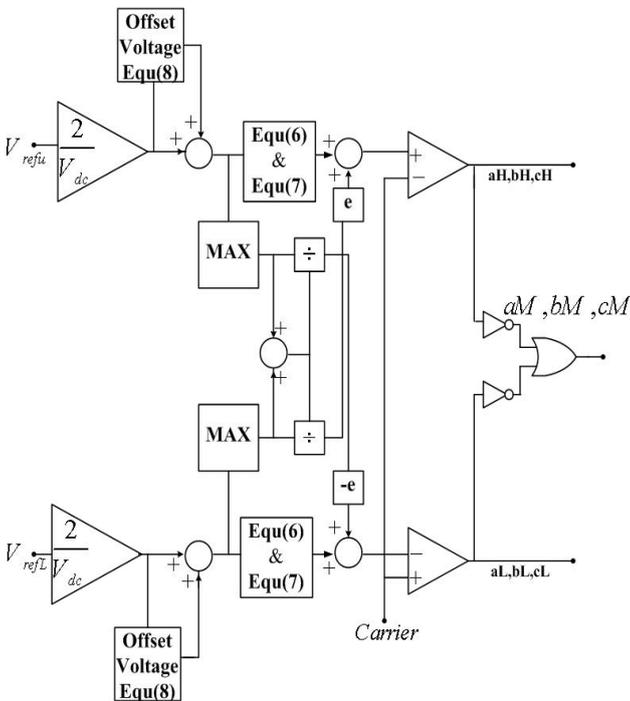
همچنین در شکل (۶) بردار  $e$  به شکل زیر اصلاح شده است:

$$e = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$$

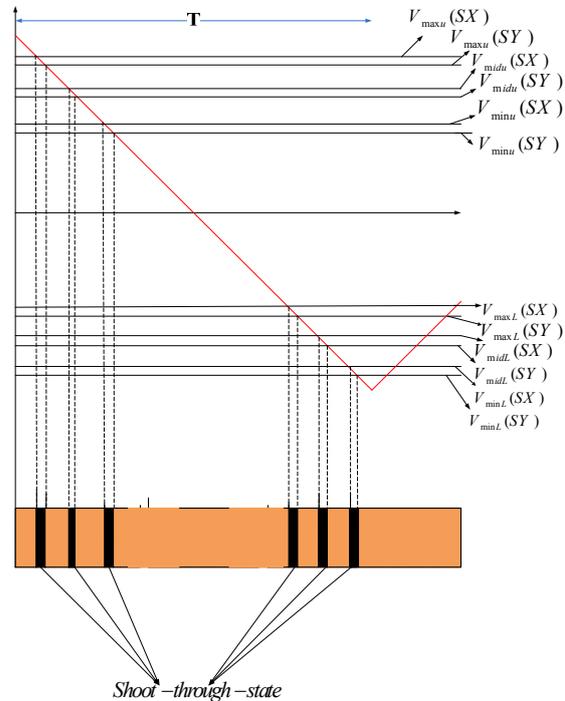
در اشکال (۷) و (۸) فرمان ولتاژ نهایی فاز  $a$  خروجی‌های بالایی و پایینی نشان داده شده است.

مطابق با شکل (۵) در هر پریود سوئیچینگ شبکه‌ی امپدانس  $(T)$ ، شش بار حالت اتصال کوتاه رخ می‌دهد که دو برابر حالات اتصال کوتاه رخ داده در اینورتر  $Z$ -source سه فاز سه ساق است. بنابراین باید زمان هر اتصال کوتاه نصف شود  $(T/6)$  تا مجموع زمان حالات اتصال کوتاه در یک پریود  $T$  برابر  $T_0$  باشد. به این منظور مقادیر افست افزوده شده به فرمان ولتاژها در رابطه‌ی (۵) نصف شده، رابطه (۷) حاصل می‌شود. پس برای محاسبه افست‌های متناسب با ضریب تقویت در اینورتر نه سوئیچ ی  $Z$ -Source به جای رابطه‌ی (۵) باید از رابطه‌ی (۷) استفاده شود.

$$\begin{aligned} V_{\max}(SX) &= V_{\max} + \frac{T_0}{2T} \\ V_{\max}(SY) &= V_{\max} + \frac{T_0}{6T} \\ V_{\text{mid}}(SX) &= V_{\text{mid}} + \frac{T_0}{6T} \\ V_{\text{mid}}(SY) &= V_{\text{mid}} - \frac{T_0}{6T} \\ V_{\min}(SX) &= V_{\min} - \frac{T_0}{6T} \\ V_{\min}(SY) &= V_{\min} - \frac{T_0}{2T} \end{aligned} \quad (9)$$

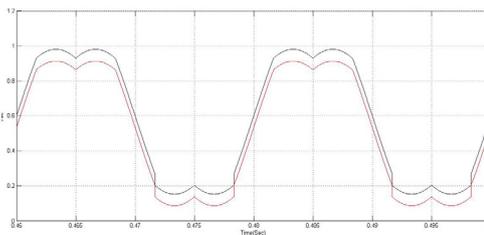
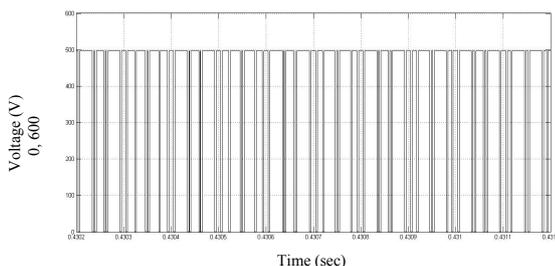


شکل ۶: بلوک دیاگرام روش سوئیچینگ پیشنهادی برای اینورتر نه سوئیچ ی  $Z$ -Source



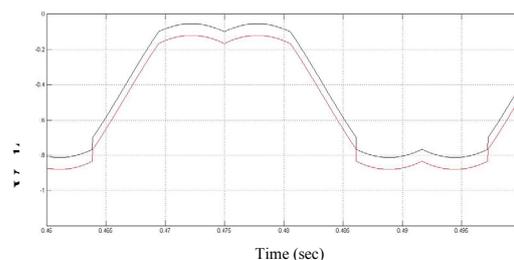
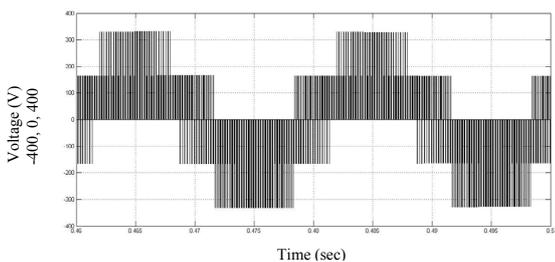
شکل ۵: تعداد اتصال کوتاه ایجاد شده در یک پریود سوئیچینگ شبکه‌ی امپدانس

های بالایی و پایینی اینورتر نشان داده شده اند.



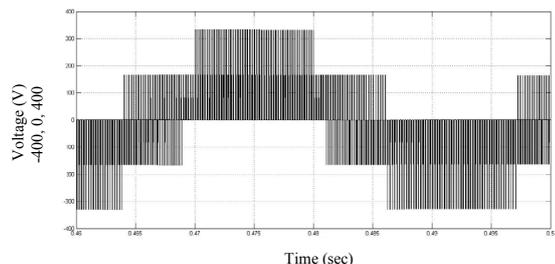
شکل ۷: فرمان ولتاژ فاز a خروجی بالایی (روش پیشنهادی)

شکل ۹: ولتاژ خروجی شبکه‌ی امپدانس Z-Source

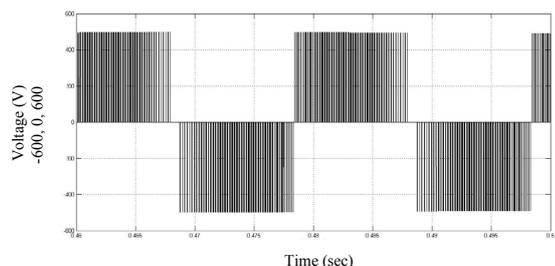


شکل ۸: فرمان ولتاژ فاز a خروجی پایینی (روش پیشنهادی)

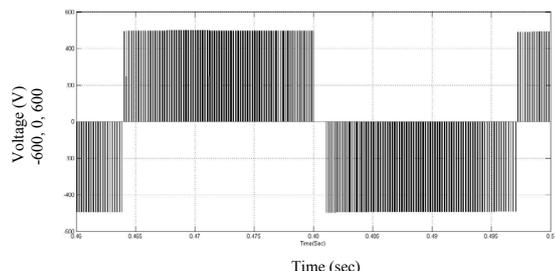
شکل ۱۰: ولتاژ فاز a خروجی بالایی



شکل ۱۱: ولتاژ فاز a خروجی پایینی



شکل ۱۲: ولتاژ خط ab خروجی بالایی



شکل ۱۳: ولتاژ خط ab خروجی پایینی

## ۵. نتایج شبیه سازی

مشخصات بارهایی که در شبیه سازی به عنوان بارهای خروجی های بالایی و پایینی استفاده شده اند به ترتیب عبارتند از:

$$R_u = 7\Omega \quad L_u = 15mH$$

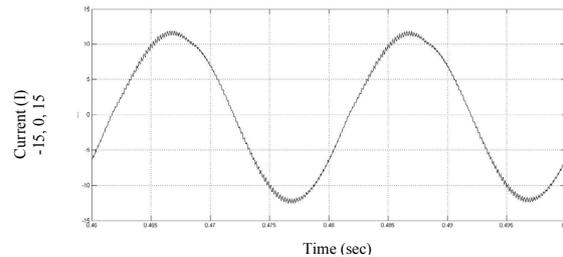
$$R_L = 6\Omega \quad L_L = 20mH$$

فرکانس سوئیچینگ هنگام انجام شبیه سازی برابر 5KHZ انتخاب گردیده است. همچنین فرکانس خروجی های بالایی و پایینی به ترتیب ۵۰ و ۳۰ هرتز بوده است. ولتاژ باس DC نیز ۳۰۰ ولت است.

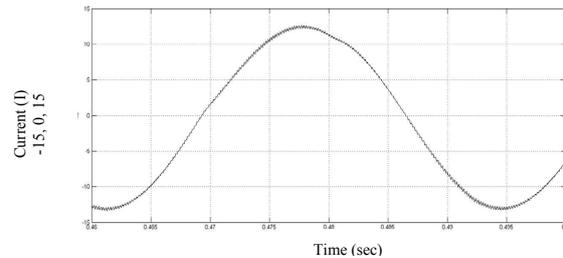
به هنگام شبیه سازی فرمان های ولتاژ خروجی های بالایی و پایینی به ترتیب ۱۱۰ ولت و ۱۰۰ ولت بوده اند. ضریب تقویت شبکه‌ی Z-Source برابر ۱.۶۷ انتخاب شده است و لذا ولتاژ خروجی شبکه امپدانس تقریباً ۵۰۰ ولت خواهد بود. شکل (۹) ولتاژ خروجی شبکه امپدانس Z-Source را نشان می دهد.

اشکال (۱۰) و (۱۱) به ترتیب ولتاژهای خروجی  $v_{anL}$  و  $v_{anu}$  را به نمایش می گذارند. همچنین شکل موجهای ولتاژ های خط خروجی های بالایی و پایینی به ترتیب در اشکال (۱۲) و (۱۳) نمایان است. نتایج این مرحله از شبیه سازی هم تایید کننده ی پیروی اینورتر از فرمان ولتاژ هم از نظر دامنه و هم از نظر فرکانس می باشد. در شکل های (۱۴) و (۱۵) جریان فاز a خروجی

- [5] S.M Dehghan, M.Mohamadian, A.Yazdian, F. Ashrafzadeh, "A novel space vector modulation for nine-switch converters", *Energy Conversion Congress and Exposition 2009 ECCE*, IEEE20-24, pp.885 – 891, Sept. 2009
- [6] F. Z. Peng, "Z-Source Inverter," *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 39, no. 2, pp. 504-510, 2003.
- [7] Keliang Zhou; Danwei Wang, "Relationship between space-vector modulation and three-phase carrier-based PWM: a comprehensive analysis [three-phase inverters]", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, Issue 1, pp.186 - 196, Feb. 2002



شکل ۱۴: جریان فاز a خروجی بالایی اینورتر



شکل ۱۵: جریان فاز a خروجی پایینی اینورتر

## ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش سوئیچینگ carrier-based برای اینورتر نه سوئیچ Z-source ارائه گردیده است. همان گونه که نتایج شبیه سازی‌ها نشان می‌دهند روش سوئیچینگ پیشنهادی همگی ویژگیهای مورد انتظار از اینورتر نه سوئیچ منبع امپدانس را برآورده می‌نماید. با توجه به نتایج شبیه سازی‌ها مشخص است که ولتاژهای دو خروجی اینورتر از نظر دامنه و فرکانس مستقل هستند و همچنین عمل BOOST ولتاژ هم با موفقیت انجام شده است. مزیت روش سوئیچینگ پیشنهادی سادگی آن می‌باشد که آن را برای پیاده سازی عملی مناسب می‌گرداند.

## مراجع

- [1] Kazuo Oka, Yusuke Nozawa, Ryuji Omata, Kanta Suzuki, Atsushi Furuya, and Kouki Matsuse, "Characteristic Comparison between Five-Leg Inverter and Nine-Switch Inverter", *Power Conversion Conference - Nagoya*, pp. 279-283, 2007
- [2] Tsutomu Kominami, Yasutaka Fujimoto, "A Novel Nine-Switch Inverter for Independent Control of Two Three-phase Loads", *IEEE Industry Applications Society Annual Conference (IAS)*, pp. 2346-2350, 2007
- [3] F. Z. Peng, "Z-Source Inverter," *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 39, no. 2, pp. 504-510, 2003.
- [4] P. C. Loh, D. M. Vilathgamuwa, Y. S. Lai and G. T. Chua, "Pulse-With Modulation of Z-Source Inverters," *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol. 20, no. 6, pp. 1346-1355, 2005