

## انتخاب مناسب‌ترین روش کنترل جهت اتصال موازی ۴ اینورتر استاتیک

محسن قربانعلی افجه<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> پژوهشکده برق جهاددانشگاهی، تهران، ایران

---

### چکیده

اینورترها کاربرد های زیادی به عنوان منابع تغذیه در صنایع، وسایل نقله هوایی، زمینی، ریلی و دریایی دارند و عمدتاً به منظور افزایش ظرفیت توان سیستم با یکدیگر موازی می‌شوند. همچنین عملکرد موازی مزایایی دیگری همچون امکان قابلیت توسعه و ... را به دنبال دارد. این مقاله به تشریح و شبیه سازی روش ارباب و برده برای اتصال موازی اینورترهای استاتیک می پردازد. در مقاله ابتدا سیستم کنترل تشریح می شود و نتایج شبیه سازی بیان می گردد. در نهایت وضعیتهای ویژه مانند اتصال یا قطع ارتباط یک اینورتر، مورد بررسی قرار می گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** موازی سازی اینورتر های استاتیک ، روش ارباب و برده، Master-Slave .

---

## ۱- مقدمه

اینورترهای استاتیک عمدتاً به منظور افزایش ظرفیت توان سیستم با یکدیگر موازی می‌شوند. همچنین عملکرد موازی مزایایی دیگری همچون امکان قابلیت توسعه<sup>۱</sup> ساده‌تر، ماژولاریتی<sup>۲</sup>، تعمیرپذیری<sup>۳</sup>، افزونگی<sup>۴</sup> و قابلیت اطمینان<sup>۵</sup> مطلوب‌تر را به دنبال دارد. (Xiao, 2003:844)

در طراحی ساختار موازی اینورترهای استاتیک به موارد زیر باید مدنظر قرار گیرند:

۱- در این سیستم بر خلاف اینورترهای موازی، لینک DC اینورترها مشترک است. (Kawabata, 1988: 281)

۲- در این سیستم به دلیل محدودیت فضا، اینورترها باید به صورت یک تجهیز کاملاً ماژولار در رایج‌ترین دستگاه جانمایی شوند.

۳- کابل‌های مورد نیاز برای انتقال اطلاعات بین اینورترها تا حد ممکن محدود باشند.

۴- در صورت از کارافتادن یک اینورتر یا چند اینورتر سیستم قادر به ادامه کار باشد.

## ۲- ادبیات تحقیق

### ۲-۱- مروری بر روشهای موازی سازی اینورترهای صنعتی

تفاوت عمده ساختاری بین روشهای موازی سازی در نحوه اتصالات موازی و طریقه رد و بدل نمودن اطلاعات می باشد. دو روش موازی سازی اینورترهای صنعتی عبارتند از:

• تکنولوژی Hot Sync

• روش ارباب-برده (Master-Slave)

تکنولوژی Hot Sync مبتنی بر روش droop است و نیازی به ارتباط بین اینورترها نیست. الگوریتم این روش در شکل نشان داده شده است. همانطور که مشخص است فرکانس خروجی اینورتر با توجه به توان خروجی اینورتر تنظیم می‌شود. نتایج پیاده‌سازی این الگوریتم روی دو اینورتر موازی در شکل نشان داده شده است. (Lee, 2004:456)

---

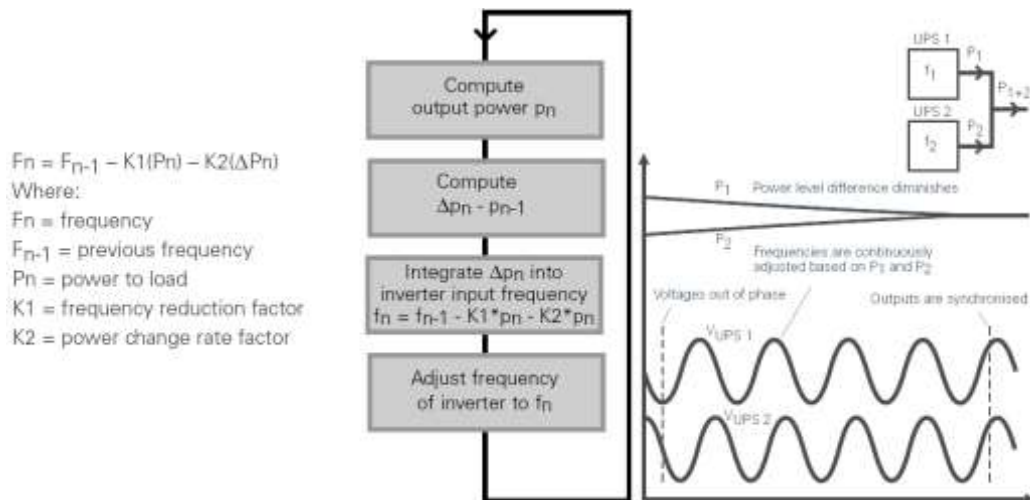
<sup>1</sup> Expandability

<sup>2</sup> Modularity

<sup>3</sup> Maintainability

<sup>4</sup> Redundancy

<sup>5</sup> Reliability



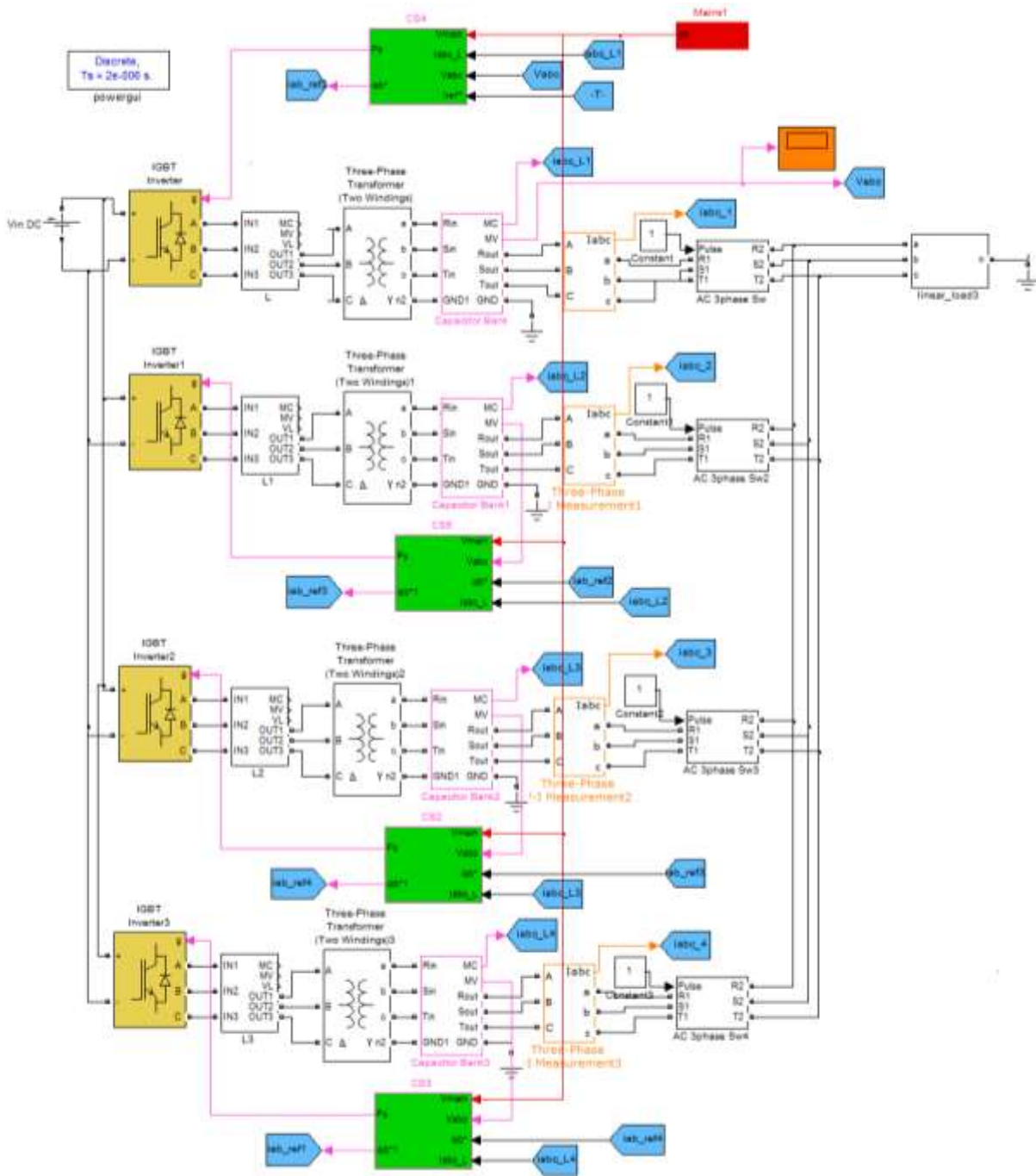
شکل ۱: الگوریتم روش Hot Sync و موازی سازی دو اینورتر با استفاده از الگوریتم روش Hot Sync

روش دیگر Master-Slave است. در این روش، اینورتر ارباب فرمانهای مجزا برای هر کدام از اینورترهای برده می فرستد. در نتیجه در صورت بروز خطای Master و یا قطع ارتباط هر کدام از Slave ها، خطای single-point رخ می دهد، ارتباط میان ماژولهای موازی را از طریق CAN ایجاد می کند. مراحل شروع به کار اینورترهای موازی در روش ارباب و برده به شرح زیر می باشد:

- شروع کار از مد بای پس آغاز شده و سپس اینورترها یکی پس از دیگری وارد مدار می شوند.
- چنانچه سوئیچ بای پس دچار مشکل باشد، می بایست بار را از مدار قطع نمود. در غیر اینصورت، اینورترها باید بلافاصله (در عرض ۳۰ ثانیه) یکی پس از دیگری وارد مدار شوند.
- مراحل اتمام کار اینورترهای موازی در روش ارباب و برده به شرح زیر می باشد:
- چنانچه سیستم در مد N+1 قرار داشته باشد، اینورتر با باز شدن سوئیچ مربوطه از مدار خارج می شود. در غیر اینصورت می بایست سیستم را به مد بای پس سوئیچ نمود.
- در صورت عدم کارکرد سوئیچ بای پس، ابتدا بار باید از مدار قطع شود. (Pei,2004:2050)

### ۳- مدل و فرضیه های تحقیق

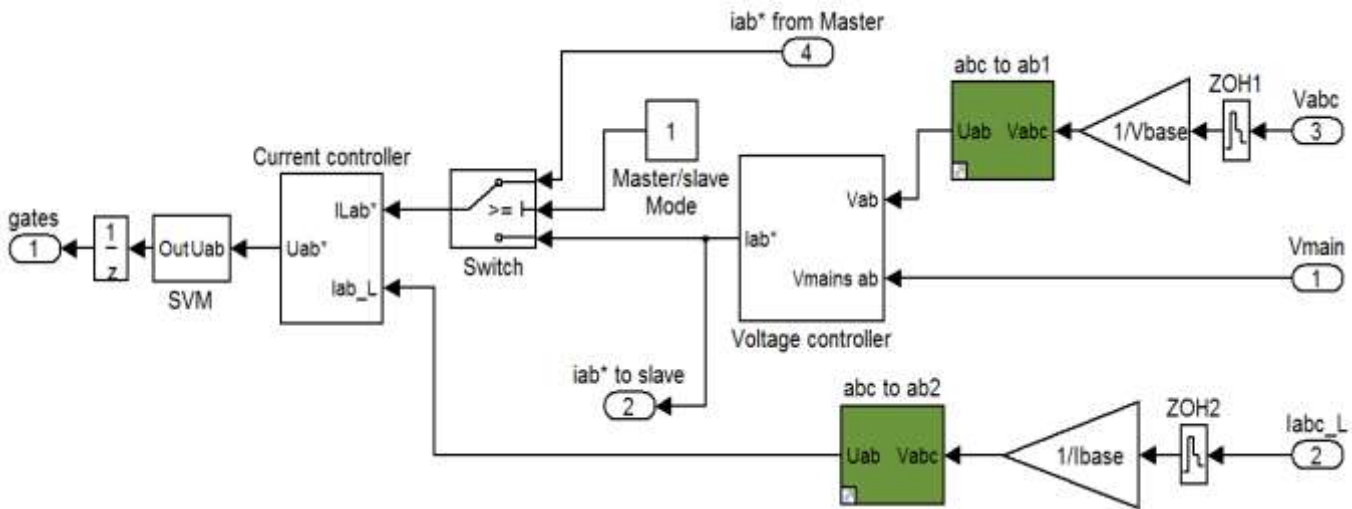
این مقاله به تشریح و شبیه سازی روش ارباب و برده برای اتصال موازی اینورترهای استاتیک می پردازد. شکل ۲ پیکربندی چندین اینورتر موازی را نشان می دهد. ساختار همه اینورترها مشابه می باشد که با بریکر به بار متصل شده اند. در ادامه ابتدا سیستم کنترل تشریح می شود و نتایج شبیه سازی بیان می گردد. در نهایت وضعیتهای ویژه مانند اتصال یا قطع ارتباط یک اینورتر، مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل ۲: پیکربندی چهار اینورتر موازی

#### ۴- روش تحقیق

سیستم کنترل هر یک از اینورترها مطابق شکل ۳ می باشد. سیستم کنترل، مشابه سیستم کنترل یک اینورتر واحد با اندکی تفاوت می باشد. چنانچه اینورتر ارباب (Master) باشد جریان مرجع حلقه کنترل جریان، توسط خروجی حلقه کنترل ولتاژ تامین می شود ولی اگر اینورتر برده (Slave) باشد جریان مرجع، از خروجی حلقه کنترل ولتاژ اینورتر فرمان دهنده بوسیله ارتباط مخابراتی تامین می گردد. در این حالت حلقه کنترل ولتاژ اینورتر برده نقشی در سیستم کنترل ندارد. [۲]



شکل ۳: سیستم کنترل تک تک اینورترهای موازی

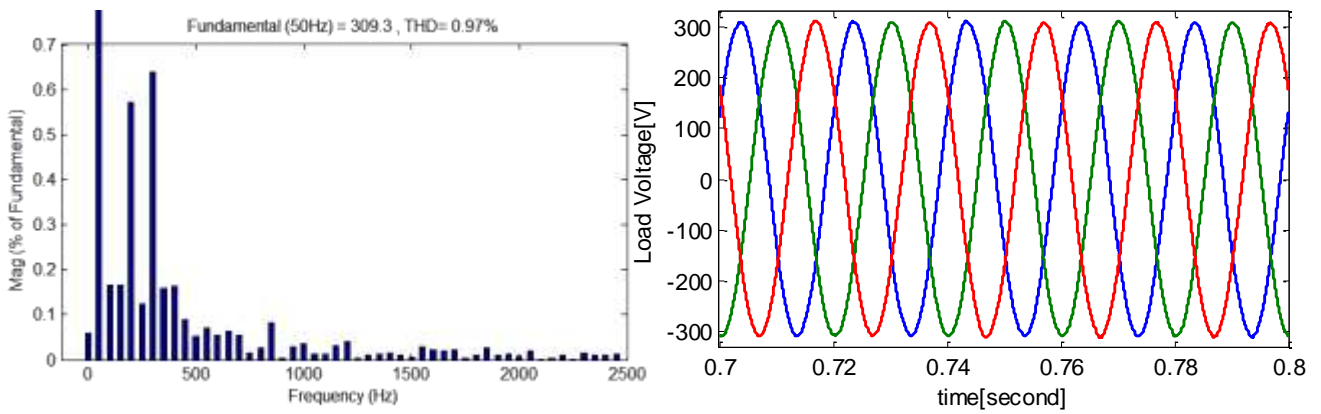
### ۵- یافته‌های تحقیق

#### ۵-۱- شبیه سازی چهار اینورتر موازی

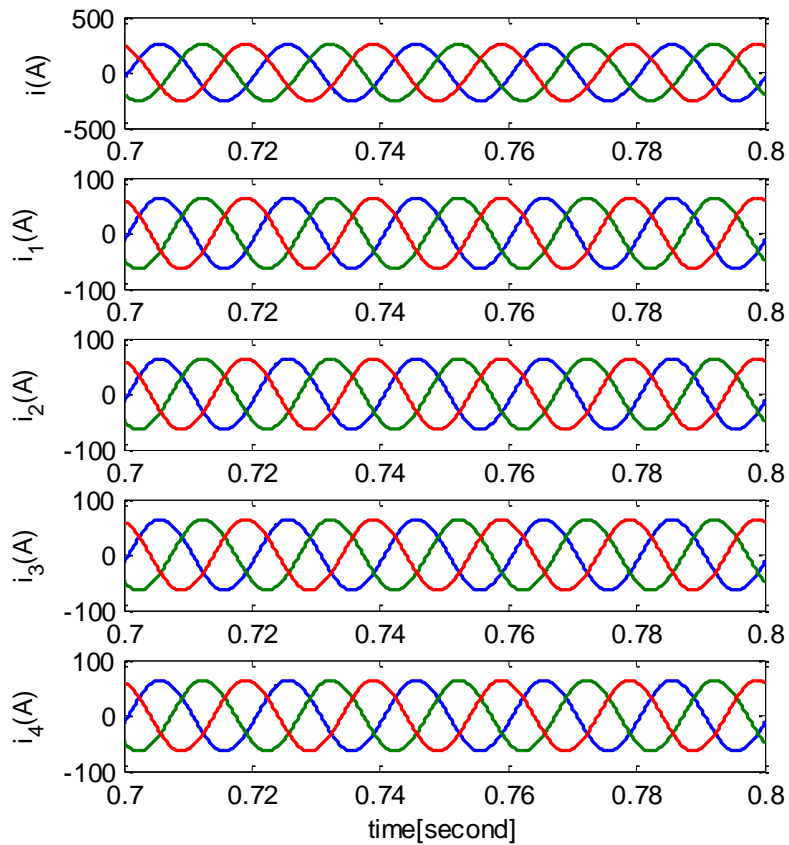
شبیه سازی اتصال موازی چهار اینورتر ۴۰ کیلوواتی برای تغذیه یک بار ۱۲۰ کیلوواتی صورت خواهد گرفت. در این سیستم در صورتیکه یکی از اینورترها از مدار خارج شود، تغذیه بار بدون خطا ادامه پیدا خواهد کرد. برای مشابه نبودن اینورترها، مقدار اندوکتانس فیلتر اینورترها متفاوت در نظر گرفته شده است. شکل های زیر تعدادی از آزمایشات انجام شده بیان شده در جدول زیر برای اینورترهای موازی را نمایش می دهند.

جدول شماره ۱. آزمایشهای شبیه سازی شده

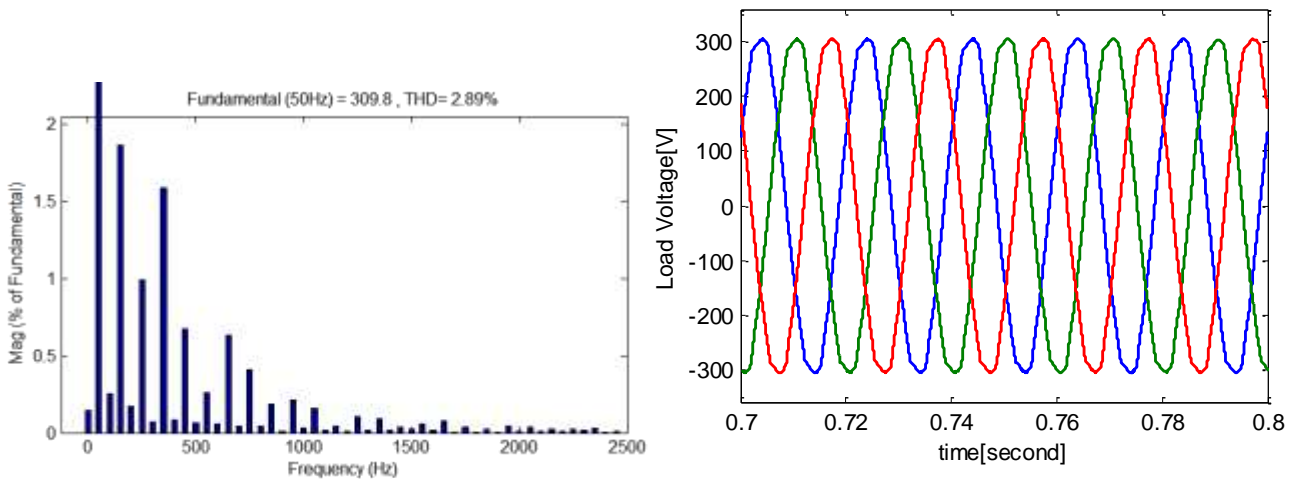
آزمایش	نوع	توضیحات
۱	بار اهمی-سلفی سه فاز متقارن (pf = 0.8)	$R_{1,2,3} = 0.968\Omega$ , $L_{1,2,3} = 2.3 \text{ mH}$
۲	دو یکسوکننده تکفاز نامتقارن	$C = 30 \text{ mF}$ , $R_s = 0.0484\Omega$ $R_1 = 5.0027 \Omega$ $R_2 = 5.0027 \Omega$ $R_3 = \text{open}$
۳	افزایش یکسوکننده تکفاز از یک فاز به دو فاز	$R_{1,2,3} = 10\Omega$ , $C = 30 \text{ mF}$ , $R_s = 0.0484\Omega$ From 31% to 62%



در آزمایش شماره (1) ولتاژ بار ل. Error! No text of specified style in document. طیف هارمونیکي ولتاژ بار در آزمایش شماره (1)



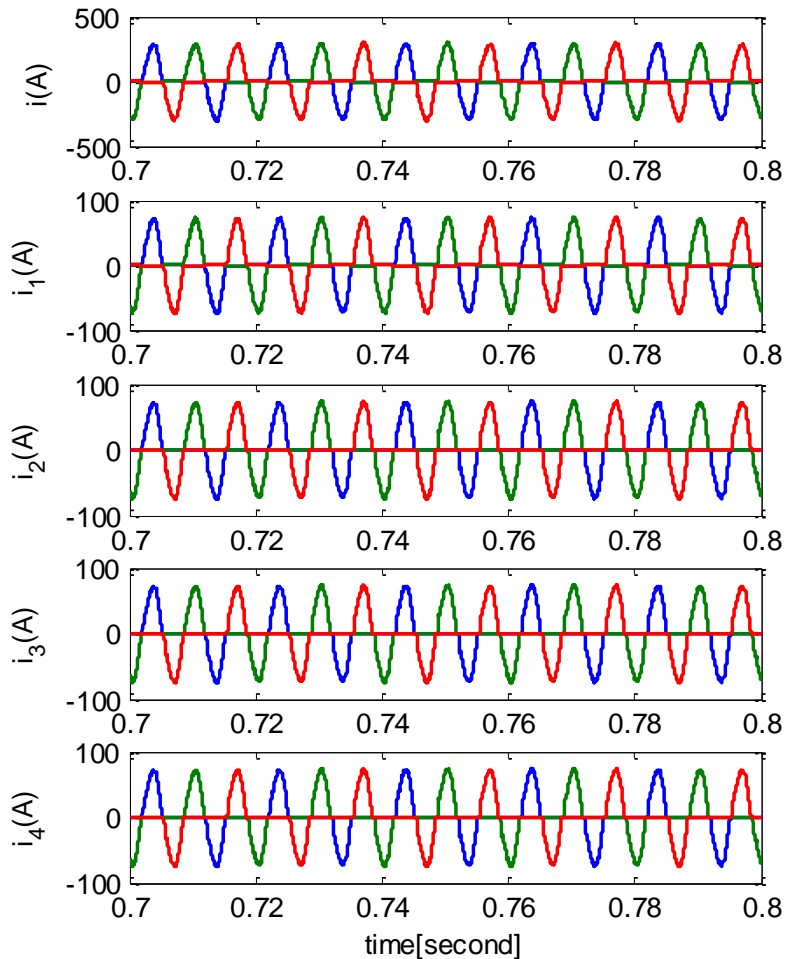
جریان اینورترها در آزمایش شماره (1). از بالا جریان بار، اینورتر اول تا چهارم



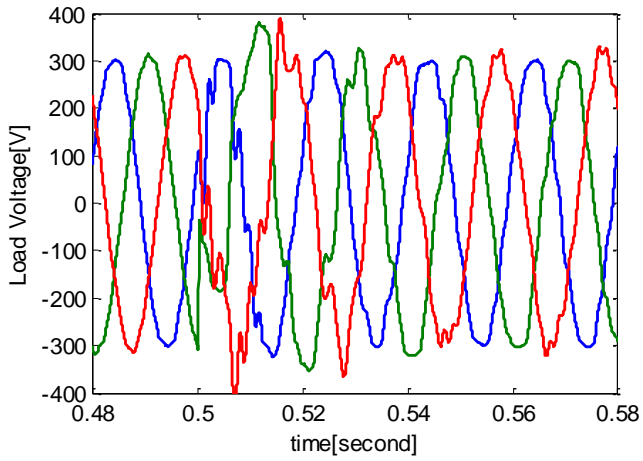
شکل ۷: ولتاژ بار در آزمایش شماره (۲)

طیف: Error! No text of specified style in document.

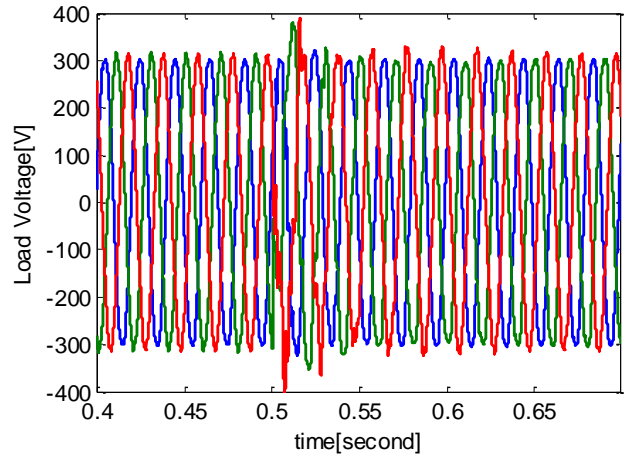
هارمونیکی ولتاژ بار در آزمایش شماره (۲)



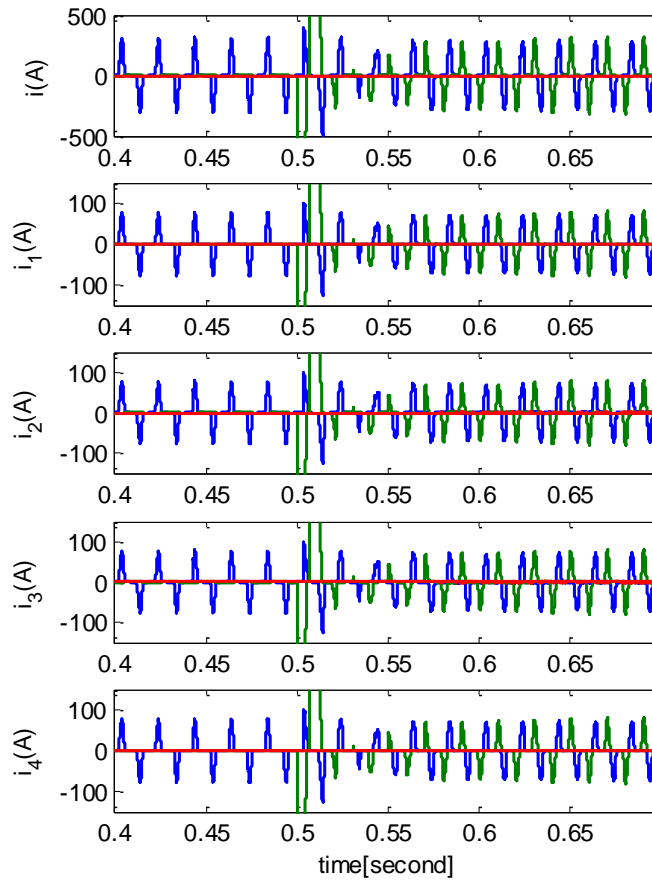
شکل ۹: جریان اینورترها در آزمایش شماره (۲). از بالا جریان بار، اینورتر اول تا چهارم



شکل ۱۱: بزرگ‌نمایی ولتاژ بار در آزمایش شماره (۳)



شکل ۱۰: ولتاژ بار در آزمایش شماره (۳)



شکل ۱۲: جریان اینورترها در آزمایش شماره (۳). از بالا جریان بار، اینورتر اول تا

چهارم.

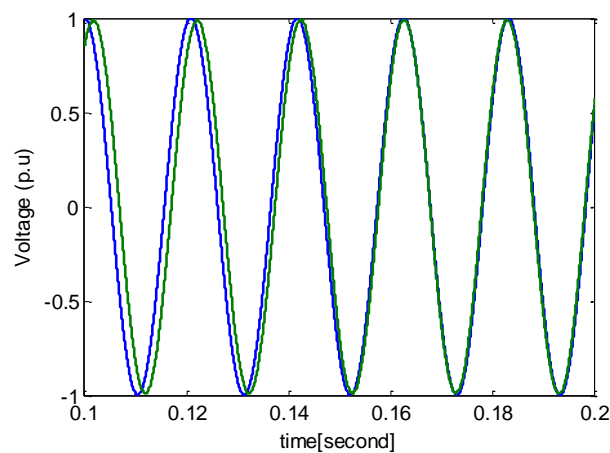
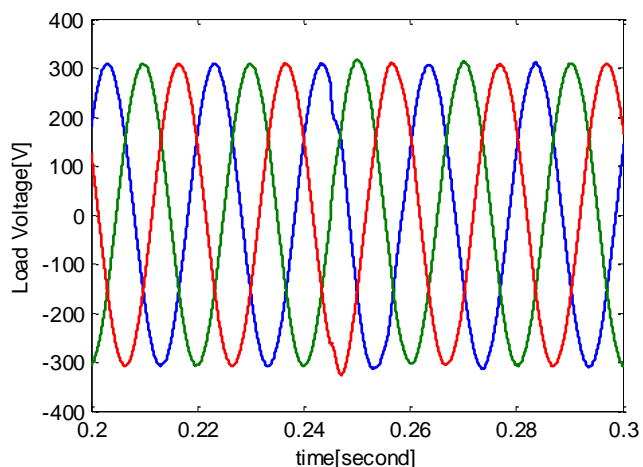


### ۵-۲- اتصال یک اینورتر به مدار

چنانچه یک اینورتر بخواهد وارد مدار شود ابتدا باید ولتاژ خروجی خود را سنکرون نماید. با توجه به شرایط سیستم، دو وضعیت ممکن است وجود داشته باشد.

الف) اگر اینورتر دیگری در مدار نباشد، اینورتر بعنوان ارباب وارد مدار شده با PLL داخلی کار می کند.

ب) اگر اینورتر دیگری در مدار باشد، اینورتر ابتدا خروجی خود را با ولتاژ بار سنکرون کرده و سپس بعنوان برده وارد مدار می شود. شکلهای زیر مربوط به شبیه سازی این حالت می باشد.

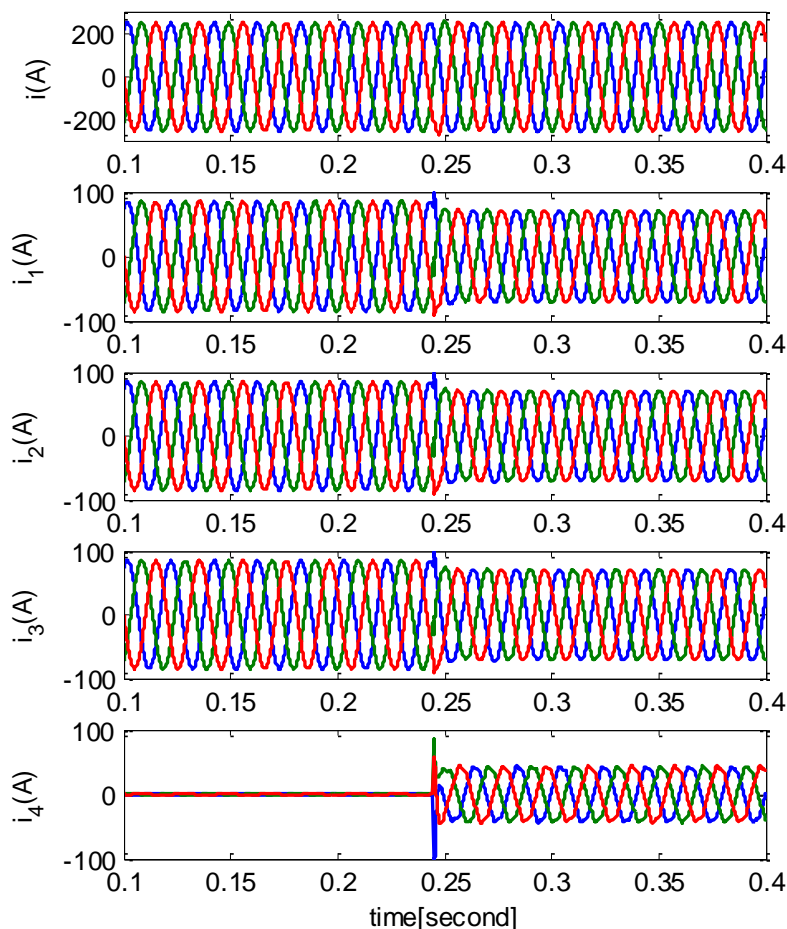


ن. ولتاژ ۱۴: Error! No text of specified style in document.

بار در در هنگام اتصال اینورتر برده

ن. ولتاژ ۱۳: Error! No text of specified style in document.

اینورتر برده و بار در هنگام اتصال اینورتر

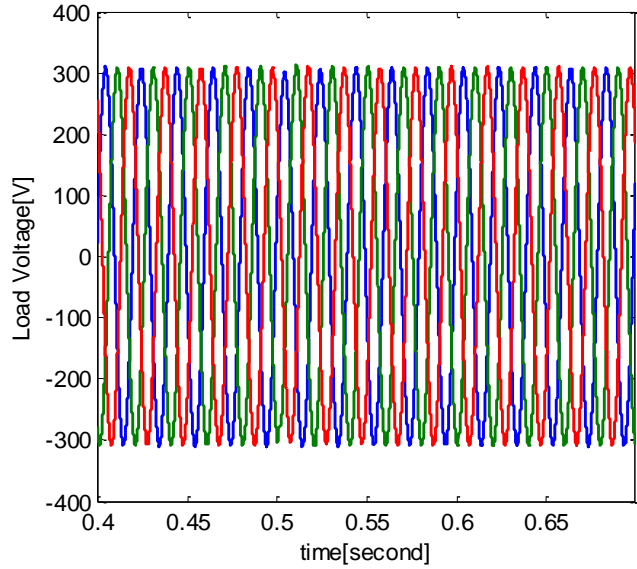
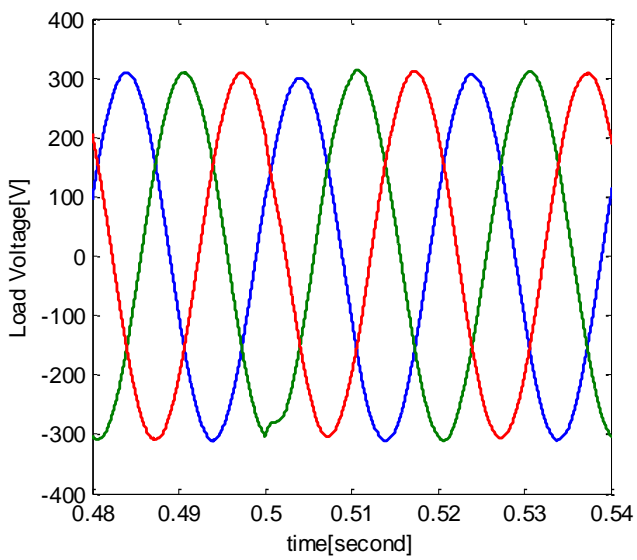


۱۵Error! No text of specified style in document. جریان اینورترها در هنگام اتصال اینورتر برده به سیستم. از بالا جریان بار، اینورتر اول تا چهارم

### ۵-۳- خروج یک اینورتر از مدار

ممکن است یک اینورتر بنا به دلایلی از مدار خارج شود. اگر این اینورتر، برده باشد، تغییری در کنترل سیستم ایجاد نمی شود و حلقه کنترل ولتاژ در ارباب، بطور خودکار خروجی خود را تنظیم می کند. نتایج شبیه سازی در این حالت در اشکال زیر قابل مشاهده است.

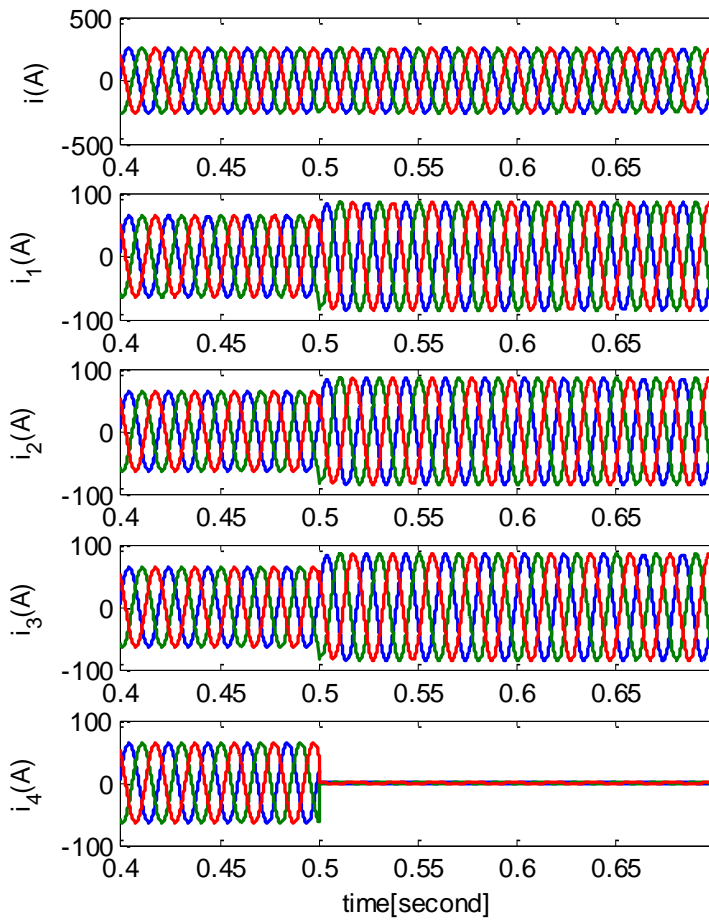
چنانچه اینورتر خارج شده از مدار ارباب باشد. برده باید ضمن تشخیص این موضوع خود بعنوان ارباب عمل کند و از حلقه کنترل ولتاژ خود برای تولید جریان مرجع استفاده نماید. اشکال زیر تایید شبیه سازی در این حالت را نشان می دهد. زمان لازم برای تشخیص خروج ارباب از مدار توسط برده 4Tm (130  $\mu$ s) فرض شده است.



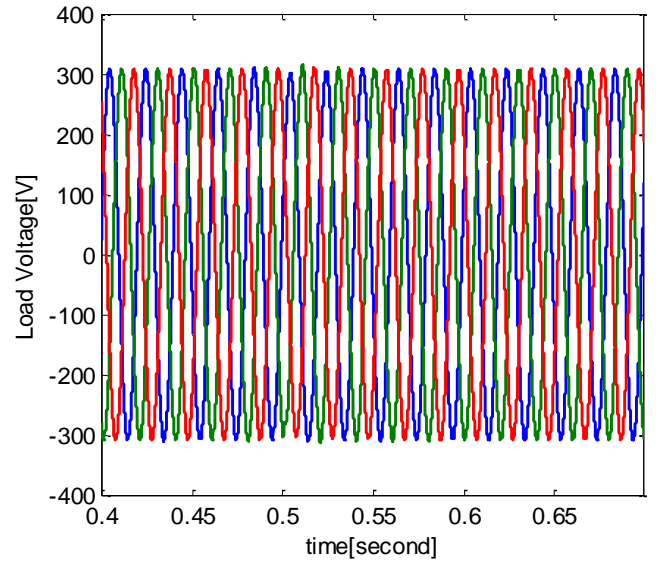
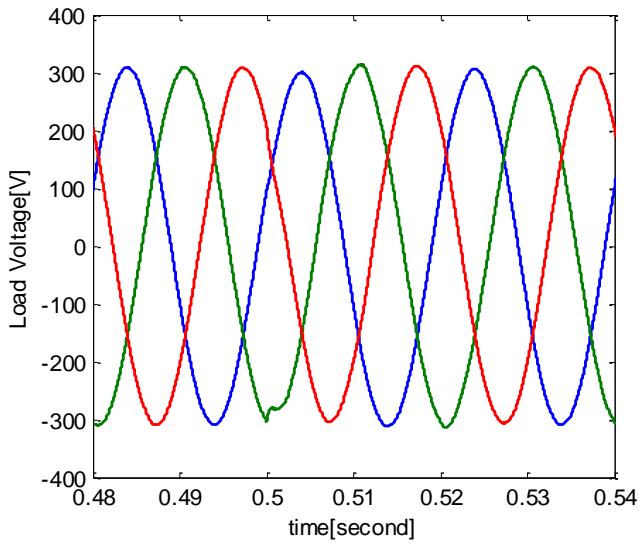
شکل ۱۷: بزرگنمایی ولتاژ بار در هنگام خروج اینورتر برده

شکل ۱۶: ولتاژ بار

در هنگام خروج اینورتر برده



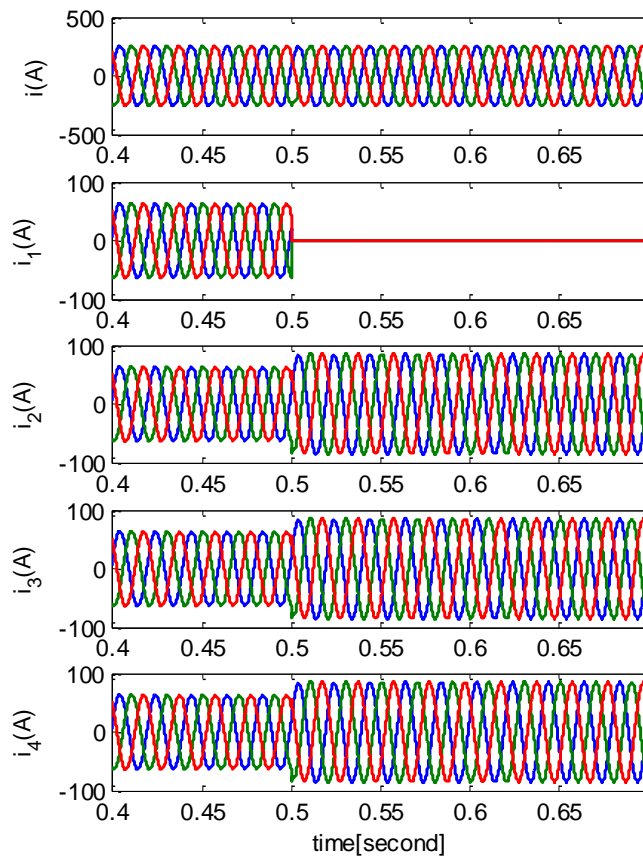
شکل ۱۸: جریان اینورترها در هنگام خروج اینورتر برده. از بالا جریان بار، اینورتر اول تا چهارم



شکل ۲۰: بزرگنمایی ولتاژ بار در هنگام خروج اینورتر ارباب

Error! No text of specified style in document.

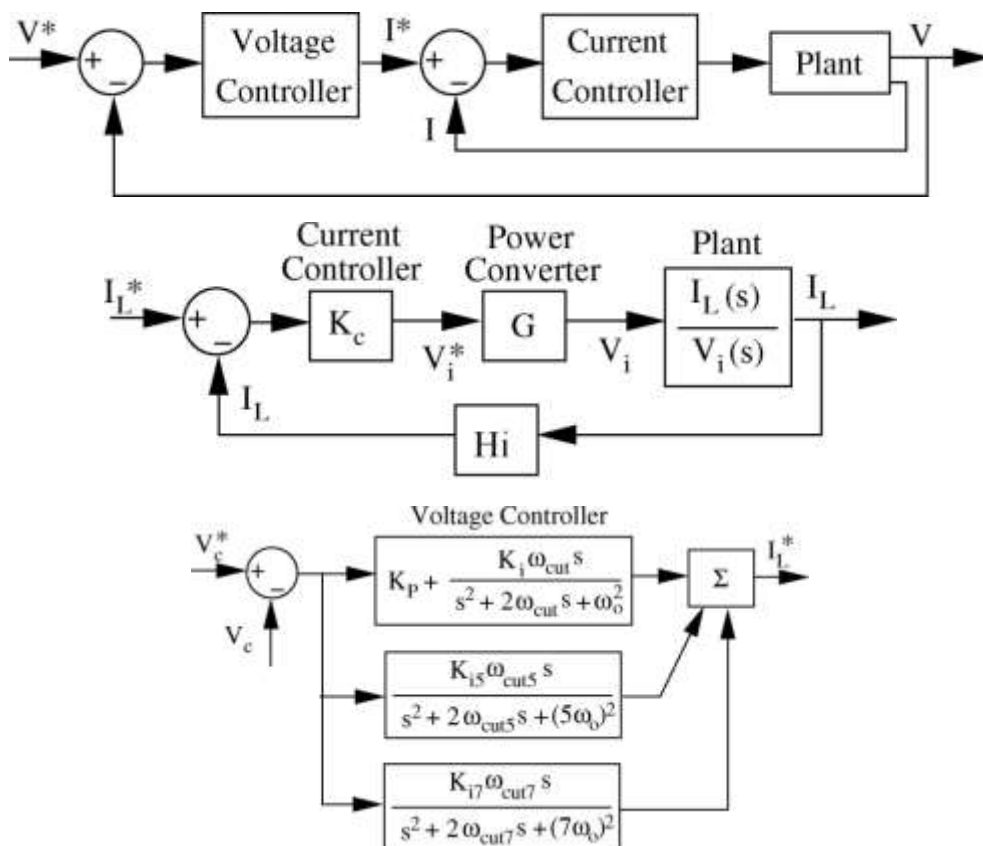
در هنگام خروج اینورتر ارباب



شکل ۲۱: جریان اینورترها در هنگام خروج اینورتر ارباب. از بالا جریان بار، اینورتر اول تا چهارم

## ۶- بحث و نتیجه گیری

برای کنترل اینورتر از روش کنترل دو حلقه‌ای شامل حلقه داخلی جریان و حلقه خارجی ولتاژ در چارچوب ساکن ( $\beta\alpha$ ) استفاده شد. دلیل پیاده‌سازی کنترلر در چارچوب ساکن حذف تبدیلهای واسط مانند تبدیل پارک می‌باشد که منجر به پیاده‌سازی عملی ساده‌تر کنترلر می‌شود. ساختار حلقه بسته حلقه داخلی جریان از یک کنترلر تناسبی برای پایداری سیستم و تضعیف نوسانات رزونانسی استفاده شد. در این روش کنترلی، متغیر استفاده در حلقه داخلی جریان، جریان سلف است که از لحاظ تضعیف نوسانات، حفاظت سیستم و موازی‌سازی اینورترها نسبت به جریان خازن ارجحتر می‌باشد. حلقه خارجی ولتاژ باید به گونه‌ای طراحی شود که ولتاژ خروجی اینورتر به ازای تغذیه تمامی بارها اعم از خطی و غیرخطی سینوسی و با حداقل اعوجاج باشد. ولتاژ خروجی در هنگام تغذیه بارهای غیرخطی مانند یکسوسازها عمدتاً شامل هارمونیکهای سه، پنج، هفت و یازده و سیزده است، کنترلر از چندین بانک موازی ترمهای تناسبی و رزونانسی در فرکانسهای فرد تا مرتبه ۱۳ تشکیل شده است. برای موازی‌سازی هم باید از روش ارتباطی چند مستر همچون CAN که نرخ ارسال زیادی دارد باید استفاده کرد.



شکل ۲۲: روش کنترل دو حلقه‌ای اینورتر در چارچوب ساکن

1. T. Kawabata, S. Higashino, "Parallel operation of voltage source inverters," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 24, no. 2, pp. 281–287, Mar./ Apr. 1988
2. W.C. Lee, T.K. Lee, S.H. Lee, K.H. Kim, D.S. Hyun, I.-Y. Suh, "A master and slave control strategy for parallel operation of three phase UPS systems with different ratings," *in Proc. IEEE APEC*, pp. 456–462, 2004.
3. Y. Pei, G. Jiang, X. Yang, Z. Wang, "Auto-master–slave control technique of parallel inverters in distributed AC power systems and UPS," *in Proc. IEEE PESC*, 2004, pp. 2050–2053.
4. Xiao Sun, Yim-Shu Lee, and Dehong Xu, "Modeling, Analysis, and Implementation of Parallel Multi-Inverter Systems with Instantaneous Average-Current-Sharing Scheme", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 18, NO. 3, MAY 2003, pp. 844-856.