

## پایداری ریز شبکه‌های هوشمند دارای اینورترهای موازی در حالت جزیره‌ای با روش کنترل دروپ

زهرا محمدی دوست | دانشجوی کارشناسی، گروه برق، مؤسسه آموزش عالی آپادانا، شیراز، ایران.

مهدی رئیسی\* | مربی، گروه برق، مؤسسه آموزش عالی آپادانا، شیراز، ایران.

### چکیده

در این مقاله از روش کنترل دروپ به منظور حفظ پایداری ریز شبکه‌ها در حالت جزیره‌ای استفاده شده است. ریز شبکه مورد مطالعه در این مقاله شامل سه اینورتر است که به صورت موازی، یک بار مصرفی معین را تغذیه می‌کنند. در واقع روش کنترل دروپ بر مبنای اکتساب توان و جداسازی مؤلفه‌های جریان  $dq0$  از مؤلفه‌های جریان  $abc$  با استفاده از تبدیل کلارک عمل می‌کند. بدین منظور، ولتاژ و جریان خط شبکه در حالت جزیره‌ای به بلوک تبدیل توان وارد می‌گردند و سپس توان‌های حقیقی و راکتیو به دست می‌آیند. توان اکتیو با استفاده از گشتاور مکانیکی و توان راکتیو با استفاده از گشتاور تحریک به مؤلفه‌های فرکانسی تبدیل می‌شوند و با مقایسه با فرکانس مرجع، به دروپ اعمال می‌گردند. این عمل پس از چندین تکرار تا رسیدن ریز شبکه به پایداری ادامه می‌یابد. سپس ولتاژ مرجع به اینورتر VSI اعمال شده و مابقی اینورترها از آن پیروی می‌کنند.

کلیدواژه‌ها: اینورترهای متصل به شبکه، پایداری ریز شبکه‌ها، تبدیل کلارک، ریز شبکه، کنترل دروپ

## مقدمه

با توسعه و استفاده از کنترل‌کننده‌های محلی هوشمند برای ریزرئاتورها و بارهای قابل کنترل، بهره‌برداری از یک ریزشبه پایدار امکان‌پذیر شده است. ولتاژ و فرکانس ریزشبه در حالت جزیره‌ای و خدمات جانبی در حالت متصل به شبکه توسط این کنترل‌کننده‌ها تنظیم می‌گردد. همچنین این کنترل‌کننده‌ها به‌طور مؤثر تغییرات ولتاژ و فرکانس را در زمان گذر از حالت متصل به شبکه به حالت جزیره‌ای یا بالعکس، کنترل می‌کنند (Kim et al., 2010).

وظیفه اصلی کنترل‌کننده‌های ریزمنابع تبادل توان بین منابع در مکان‌های مختلف است. وظیفه دیگر این کنترل‌کننده‌ها فعال کردن مبدل‌های الکترونیک بین منابع و شبکه است. با توجه به اینکه خطوط ارتباطی برای فواصل طولانی و اهداف کنترلی پرهزینه و آسیب‌پذیر هستند، لذا سعی می‌گردد تا حد لزوم از این گونه ارتباطات (برای مسافت‌های طولانی) اجتناب گردد. بدین منظور از کنترل‌کننده‌های ولتاژ و فرکانس دروپ، به‌صورت محلی استفاده می‌شود. در این روش از اطلاعات محلی در دسترس - ولتاژ و فرکانس - برای تبادل توان استفاده می‌گردد. به‌طور کلی توان اکتیو به فرکانس و توان راکتیو به ولتاژ وابسته است (Augustine et al., 2014).

سیستم‌های ژنراتور چرخان استاندارد به‌صورت طبیعی این گونه دروپ‌ها را پشتیبانی می‌کنند. در برخی موارد می‌توان برای بهبود عملکرد از کنترل‌کننده‌های اضافی دیگر بهره گرفت. بنابراین به‌کارگیری تعداد بسیار زیادی ژنراتور در یک ریزشبه امکان‌پذیر است. به‌هرحال، چنین روشی با استفاده از اینورترهای استاتیکی استاندارد با مشخصه ولتاژ و فرکانس ثابت امکان‌پذیر نمی‌باشد. در نتیجه، یک روش کنترلی براساس ولتاژ و فرکانس دروپ مورد نیاز است (Augustine et al., 2014; Mahmood et al., 2015).

در این مقاله مفاهیم کنترل هوشمند برای رابط‌های الکترونیک قدرت در ریزمنابع ارائه شده است. راهبردهای کنترلی برای سیستم‌های اینورتر چندگانه با رویکرد مکانیسم خودسنگرون برای ژنراتورهای چرخان مرسوم بسط داده شده است. سپس نشان داده شده است که با کنترل مناسب، ولتاژ و فرکانس هر اینورتر تبادل توان اکتیو و راکتیو در سیستم فراهم می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نیز تبادل توان بین ژنراتورهای توزیع‌شده را نشان می‌دهد. در ادامه مفاهیم پارامترهای خط برای خطوط با مقاومت بالا که در ریزشبه‌های ولتاژ ضعیف مرسوم است به‌صورت روشمند مورد بحث قرار گرفته است. در پایان یک الگوریتم کنترل با استفاده از روش امیدانس ساختگی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است.

## ۲- روش کنترل دروپ

شبکه‌های ولتاژ ضعیف با نسبت بالای مقاومت به راکتانس شناخته می‌شوند. بنابراین عمدتاً بین VSC ها مقاومت کوپلینگ وجود دارد. در این شرایط توان اکتیو برای کنترل ولتاژ مناسب به‌نظر می‌رسد. به‌طور مثال، این روش می‌تواند برای بهبود ولتاژ دینامیکی به‌منظور جبران فروافتادگی‌های ولتاژ مورد استفاده قرار گیرد (تداخل کوتاه‌مدت) (Mahmood et al., 2015).

استفاده از شارش توان اکتیو برای کنترل ولتاژ می‌تواند پیامدهای مالی در برداشته باشد یا به عبارت دیگر می‌تواند معنای اقتصادی توزیع توان اکتیو را به‌طور کامل تغییر دهد. از طرفی می‌تواند سازگاری با ژنراتورهای چرخان در شبکه ولتاژ ضعیف و سازگاری با شبکه اصلی بالادست را از بین ببرد.

وظیفه دروپ‌های توان اکتیو/ راکتیو در شبکه ولتاژ ضعیف، محدود ساختن شارش توان راکتیو است. نگه‌داشتن ولتاژ در یک محدوده مجاز بایستی با یک چیدمان مناسب از خطوط ولتاژ ضعیف انجام گیرد و در نهایت سعی شود با افزایش بخش راکتیو خطوط با اضافه کردن چوک، اصلاحات ممکن صورت پذیرد (Savaghebi et al., 2012).

در این بخش تأثیر پارامترهای خط بر کنترل دروپ واحدهای VSI در ریزشکها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

### ۲-۱- انتقال توان در شبکه ولتاژ ضعیف

پارامترهای خط  $X'$ ،  $R'$  و جریان‌های نامی نوعی برای خطوط با سطح ولتاژ ضعیف، متوسط و بالا در جدول ۱ نشان داده شده است. روشن است که فرض منابع ولتاژ کوپلینگ القایی برای اینورترهای کنترل‌کننده دروپ، فقط برای خطوط ولتاژ بالا در سیستم توزیع درست است. خطوط ولتاژ متوسط پارامترهایی با قسمت اکتیو و راکتیو مشابه دارند. درحالی که خطوط ولتاژ ضعیف عمدتاً مقاومتی هستند.

جدول ۱. پارامترهای خط نوعی (Majumder et al., 2009)

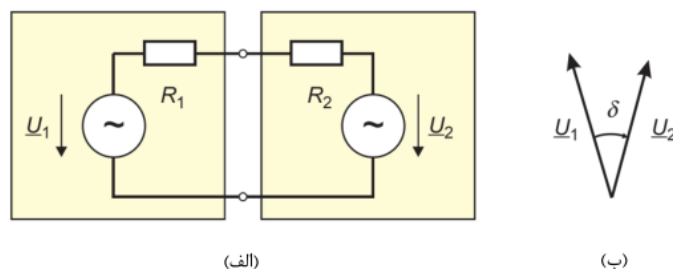
نوع خط	$R'$ (کیلو متر/اهم)	$X'$ (کیلو متر/اهم)	جریان نامی (آمپر)	$\frac{R'}{X'}$
خط ولتاژ ضعیف	۰/۶۴۲	۰/۰۸۳	۱۴۲	۷/۷
خط ولتاژ متوسط	۰/۱۶۱	۰/۱۹۰	۳۹۶	۰/۸۵
خط ولتاژ بالا	۰/۰۶	۰/۱۹۱	۵۸۰	۰/۳۱

توان اکتیو  $P_{inv}$  و توان راکتیو  $Q_{inv}$  منابع ولتاژ کوپلینگ مقاومتی - در اینجا اینورتر و شبکه - با نمادهای اخذ شده از شکل ۱ می‌تواند به صورت زیر محاسبه شوند:

$$Q_{inv} = \frac{U_{inv} \cdot U_{grid}}{R_{line}} \cdot \sin(\delta) \quad (1)$$

$$P_{inv} = \frac{U_{inv}^2}{R_{line}} - \frac{U_{inv} \cdot U_{grid}}{R_{line}} \cdot \cos(\delta) \quad (2)$$

معادله (۲) نشان می‌دهد در شبکه‌های ولتاژ ضعیف، شارش توان اکتیو با ولتاژ ارتباط دارد. درحالی که اختلاف ولتاژ بین منابع باعث شارش توان راکتیو می‌شود (معادله (۱)). لذا استفاده از دروپ‌های توان اکتیو/ولتاژ و توان راکتیو/فرکانس - از این پس "دروپ‌های مخالف" - در شبکه ولتاژ ضعیف و به جای آن دروپ‌های توان راکتیو/ولتاژ و توان اکتیو/فرکانس - "دروپ‌های معمول" - را پیشنهاد می‌دهد.



شکل ۱. الف) منابع ولتاژ متصل شده مقاومتی. ب) نمایش فازوری (Majumder et al., 2009)

### ۲-۲- مقایسه مفاهیم دروپ در شبکه ولتاژ ضعیف

در ادامه مزایا و معایب استفاده از دروپ‌های مخالف و معمول در سطح ولتاژ ضعیف در جدول ۲ خلاصه شده است. همان‌طور که در جدول ۲ دیده می‌شود، تنها مزیت استفاده از دروپ‌های مخالف، کنترل مستقیم ولتاژ است. اما اگر ولتاژ از این طریق کنترل گردد هیچ توزیع توانی امکان‌پذیر نخواهد بود. توان هر بار به‌طور کامل از طریق

نزدیک‌ترین ژنراتور تأمین خواهد شد. از آنجایی که این امر به‌طور کامل امکان‌پذیر نیست، لذا انحرافات ولتاژ در شبکه باقی خواهد ماند.

جدول ۲. مقایسه مفاهیم دروپ برای سطح ولتاژ ضعیف (Majumder et al., 2009)

نوع سازگاری	دروپ معمول	دروپ مخالف
سازگاری با سطح ولتاژ بالا	دارد	ندارد
سازگاری با ژنراتورهای چرخان	دارد	ندارد
کنترل ولتاژ مستقیم	ندارد	دارد
توزیع توان اکتیو	دارد	ندارد

استفاده از دروپ‌های معمول در سطح ولتاژ بالا توزیع دقیق توان از طریق تبادل ولتاژ ژنراتورهای چرخان را فراهم می‌کند. این نکته قابل ذکر است که انحرافات ولتاژ در شبکه به ساختار شبکه و استانداردهای مرتبط با آن بستگی دارد.

### ۳-۲- بهره‌برداری غیرمستقیم از دروپ‌ها

در واقع در روش دروپ معمول در شبکه‌های ولتاژ ضعیف می‌توان تبادل توان راکتیو را با تغییرات ولتاژ ژنراتور در نظر گرفت. توان راکتیو هر ژنراتور با تنظیم پروفایل ولتاژ خروجی، توزیع توان اکتیو مطلوب را نتیجه می‌دهد. در شبکه ولتاژ ضعیف توان اکتیو تابعی از زاویه فاز می‌باشد که در معادله (۱) این رابطه دیده می‌شود. توان اکتیو با دروپ توان اکتیو/فرکانس تنظیم می‌گردد. البته تمام حلقه بایستی پایدار باشد. چهار نقطه کاری مجزای پایدار بسته به شیب دروپ‌ها قابل تحقق است. از این نقاط تنها دو مورد از نظر پیاده‌سازی عملی توجیه‌پذیر خواهند بود (Dragicevic et al., 2014).

با استخراج نقاط کاری دروپ‌های معمول در شبکه‌های LV براساس معادله (۲) پایداری تابع تبدیل توان به شیوه‌ای ساده قابل ارزیابی می‌باشد. از آنجا که در یک نقطه کاری قابل قبول  $\delta$  بسیار کوچک است لذا  $\cos \delta$  تقریباً برابر با یک می‌شود. با مرتب کردن دوباره معادله (۲) براساس توان  $P_{inv}$  و ولتاژ شبکه  $U_{grid}$ ، دو جواب برای ولتاژ اینورتر  $U_{inv}$  از معادله درجه دوم به دست می‌آید:

$$U_{inv1,2} = \frac{U_{grid}}{2} \pm \sqrt{\frac{U_{grid}^2}{2} + P_{inv} \cdot R} \quad (3)$$

در ادامه هر دو راه‌حل در نظر گرفته می‌شود.  $U_{inv1}$  ولتاژ نزدیک به ولتاژ شبکه است و  $U_{inv2}$  مقدار منفی کوچکی است. که این بر ۱۸۰ درجه اختلاف فاز دلالت دارد. بنابراین در معادله (۴) ضریب  $k$  با  $k = 1$  برای راه‌حل اول و  $k = -1$  برای راه‌حل دوم معرفی شده است. ضریب  $k$  تقریبی از تابع  $\cos$  در معادله (۲) می‌باشد:

$$P_{inv} = \frac{U_{inv1,2} \cdot U_{grid}}{2} = U_{inv1,2} \cdot k_{1,2} \quad (4)$$

توان اینورتر  $P_{inv}$  با تغییر ولتاژ اینورتر  $U_{inv}$  به وسیله توان راکتیو خود به شرح زیر تنظیم می‌گردد:

$$U_{inv1,2} - U_{grid} = U_{inv1,2} \cdot q_{droop} \quad (5)$$

از معادله (۱)  $Q_{inv}$  تابعی از زاویه  $\delta$  بوده و برای مقادیر کوچک از آن داریم:

$$U_{inv1,2} = \delta \cdot \frac{U_{inv1,2} \cdot U_{grid}}{R} \quad (6)$$

$\delta$  مجموع اختلاف فرکانس ژنراتور با فرکانس شبکه در طول زمان است:

$$\delta = \int \Delta f dt \quad (7)$$

$$\Delta f = (P_{set} - P_{inv}) \cdot P_{droop} \quad (8)$$

مشخصه کامل این فرآیند تضمین توزیع دقیق توان ذکر شده در بالا است. با جایگزینی پس رو از (۵) تا (۸) و حل برای  $P_{inv}$ :

$$P_{inv} = \int P_{set} - P_{inv} dt \cdot \frac{P_{droop} \cdot Q_{droop} \cdot k_{1,2} \cdot U_{grid} \cdot U_{inv1,2}^2}{R^2} \quad (9)$$

که توصیفی از یک معادله تأخیری مرتبه اول با جواب زیر می باشد (Han et al., 2014):

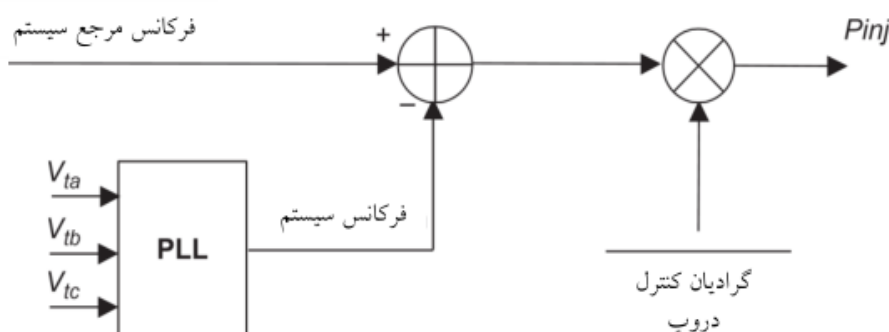
$$P_{inv} = P_{set}(1 - e^{C \cdot t}) \quad (10)$$

این جواب ساده شده با فرض ثابت بودن  $U_{inv}$  در طول زمان و با صرف نظر از دینامیک اکتساب توان به دست آمده است. معادله (۱۰) فقط در صورتی که ثابت  $C$  مقداری مثبت باشد پایدار است، به این معنی که:

$$P_{droop} \cdot Q_{droop} \cdot k_{1,2} > 0 \quad (11)$$

### ۳- شبیه سازی و تحلیل نتایج

روش سیستم کنترل مستقیم با خط دروپ برای ماشین های سنکرون استفاده می شود. این روش نیز برای اندازه گیری فرکانس سیستم و کنترل توان واقعی نیز می تواند به کار برده شود (شکل ۲). فرکانس سیستم از طریق روش حلقه قفل شونده فاز (PLL) اندازه گیری می شود. این روش براساس ولتاژ ترمینال سه فاز عمل می کند. فرکانس سیستم با یک مقدار مرجع (معمولاً ۵۰ هرتز) مقایسه می گردد. مقدار اختلاف ولتاژ به وسیله یک فیلتر پایین گذر فیلتر شده و در یک مقدار ثابت ضرب می شود تا کنترل دروپ حاصل گردد (Barklund et al., 2008).

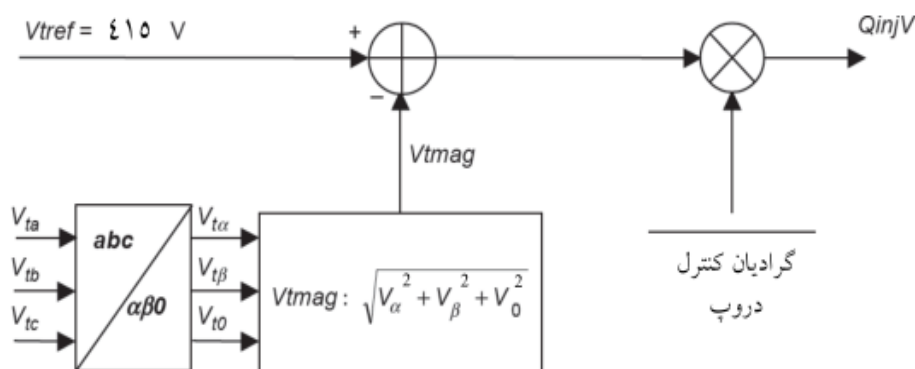


شکل ۲. نمودار بلوکی کنترل VSC برای تنظیم فرکانس (Vandoorn et al., 2012)

برای بسیاری از سیستم های قدرت با نسبت بالای راکتانس به مقاومت، معادله (۱) این حقیقت را بیان می کند که اختلاف ولتاژ باعث شارش توان راکتیو می شود یا بالعکس. این رابطه نیز تأثیر سیلان توان راکتیو روی ولتاژ خروجی را نشان می دهد. بنابراین توان راکتیو به وسیله دروپ  $V$  برحسب  $Q$  کنترل می شود.

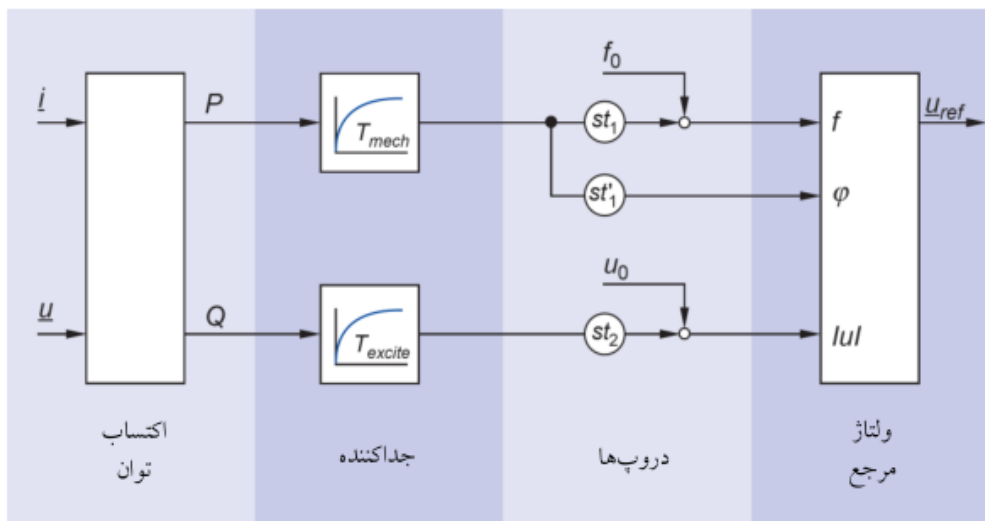
روش کنترل تنظیم ولتاژ در شکل ۳ به صورت نمودار بلوکی نشان داده شده است. ولتاژهای خروجی سه فاز ( $V_{ta}$ ,  $V_{tb}$ ,  $V_{tc}$ ) اندازه گیری شده و به عنوان ورودی به کنترل کننده اعمال می گردد. مقدار بردار ولتاژ خروجی ( $V_{mag}$ )

محاسبه شده و با مقدار مرجع (به‌طور مثال  $V_{tref} = 415 \text{ V}$ ) مقایسه می‌شود. ولتاژ خطا به وسیله یک فیلتر پایین گذر فیلتر شده و در یک مقدار ثابت ضرب شده تا کنترل دروپ VSC به دست آید. خروجی بلوک کنترلی تنظیم ولتاژ مقدار توان راکتیو ( $Q_{injV}$ ) را تولید می‌کند. این توان تزریقی برای ثابت نگه داشتن ولتاژ خروجی مطابق با مقدار مرجع دروپ مورد نیاز است.



شکل ۳. نمودار بلوکی کنترل VSC برای تنظیم ولتاژ (Vandoorn et al., 2012)

به‌هرحال، به‌دست آوردن مقدار دقیقی از فرکانس لحظه‌ای در یک سیستم واقعی کار ساده‌ای نیست. در مقابل اندازه‌گیری مقدار توان لحظه‌ای به‌سادگی امکان‌پذیر است. بنابراین در (Dragicevic et al., 2014; Vandoorn et al., 2012) پیشنهاد داده شده است که کنترل در جهت عکس پیاده‌سازی شود. به این صورت که توان خروجی مبدل منبع ولتاژ اندازه‌گیری شده و این مقدار برای تنظیم فرکانس خروجی استفاده شود. این نمودار در شکل ۴ نشان داده شده است. به‌طور مشابه توان راکتیو اندازه‌گیری شده و برای تنظیم مقدار خروجی استفاده می‌شود. توان اکتیو و راکتیو از ولتاژ اینورتر و جریان خروجی در بلوک اکتساب توان تخمین زده می‌شوند. یک تأخیر مرتبه اول برای عبور هر کدام از مقادیر  $P$  و  $Q$  استفاده می‌شود که می‌تواند بخشی از فیلترهای اندازه‌گیری توان باشد. این فیلترها می‌توانند برای جداسازی دو کانال کنترلی به کار گرفته شوند. در ضمن می‌توان برای تنظیم بازه زمانی تغییرات ولتاژ و فرکانس اینورتر برحسب تغییرات توان از این فیلترها استفاده نمود. کنترل دروپ در مرحله بعد برای مشخص کردن ولتاژ مرجع اینورتر اعمال می‌گردد. از توان اکتیو برای تعیین فرکانس و از توان راکتیو برای مشخص کردن مقدار توان عبوری از دروپ استفاده می‌شود. می‌توان به این نکته اشاره کرد که اصلاح فاز نسبت مستقیم با توان اکتیو اندازه‌گیری شده دارد. این موضوع پایداری سیستم را افزایش می‌دهد.

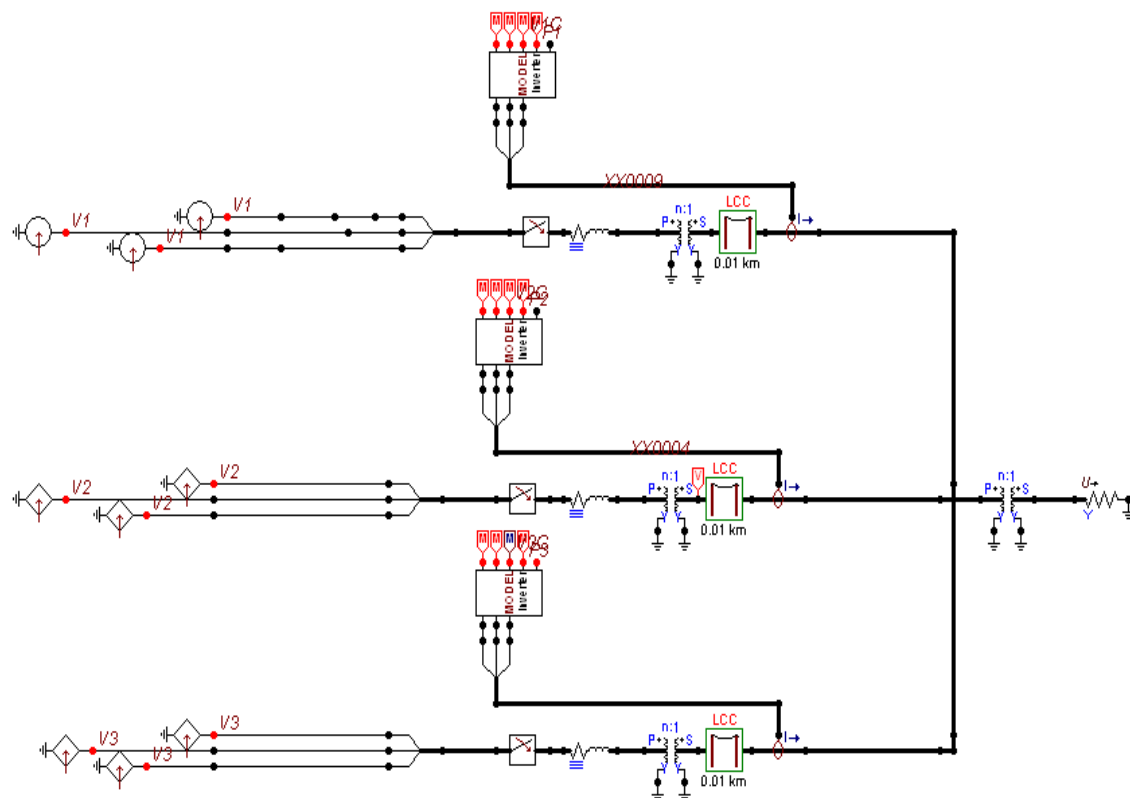


شکل ۴. استراتژی کنترل براساس اکتساب توان (Vandoorn et al., 2012)

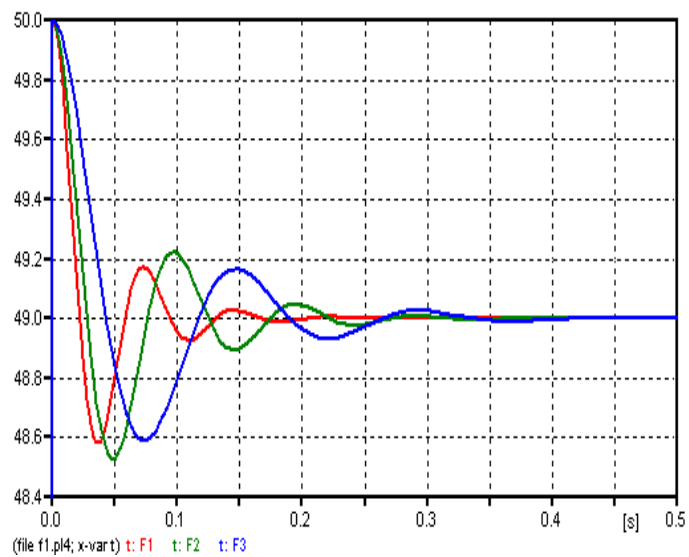
شکل ۵ تقسیم توان میان سه اینورتر تک فاز که برای این طرح برنامه‌ریزی شده‌اند را نشان می‌دهد. این تجهیزات با یک کابل ولتاژ ضعیف به طول تقریبی ۱۰ متر به یک بار مقاومتی وصل شده‌اند. فرکانس دروپ اینورترهایی که با  $L_1$  و  $L_2$  مشخص شده روی مقدار یک هرتز/توان نامی تنظیم شده است و فرکانس دروپ اینورتری که با  $L_3$  مشخص شده روی مقدار دو هرتز/توان نامی تنظیم گردیده است. بدیهی است که این روش به اینورتر  $L_3$  اجازه می‌دهد که نیمی از توان دو اینورتر دیگر را تأمین کند. توان اکتیو تبادلی به وسیله ثابت‌های دروپ تعریف می‌شود. این نکته قابل توجه است که توان راکتیو؛ که در جریان‌های اینورتر مشاهده می‌شود، به دلیل اختلاف فاز بین اینورتر  $L_3$  با  $L_1$  و  $L_2$  شارش می‌یابد.

در ادامه یک مورد شبیه‌سازی شده از یک ریزشکه ارائه شده است. ریزشکه متشکل از سه اینورتر بوده که به سیستم توزیع ولتاژ متوسط ۱۵ کیلوولت متصل شده است. مدار معادل این سیستم در شکل ۵ نشان داده شده است. شبیه‌سازی‌ها با نرم‌افزار ATP/EMTP انجام گرفته است. اینورترها به وسیله منابع ولتاژ سه فاز قابل کنترل نمایش داده شده است. سیستم توزیع شامل کلیدها، خطوط هوایی (بلوک‌های  $\pi$ )، ترانسفورماتورها و بارهای مصرفی می‌باشد. سه اینورتر به صورت موازی توان یک بار مقاومتی به میزان ۱۰۰ کیلووات را از طریق سیستم توزیع ولتاژ متوسط تأمین می‌کنند. اینورترها با الگوریتم بیان شده در شکل ۴ کنترل می‌شوند.

بار مصرفی، فرکانس سیستم ریزشکه را به مقدار ۴۹ هرتز کاهش می‌دهد (شکل ۶). فرکانس می‌تواند با استفاده از یک کنترل ثانویه به ۵۰ هرتز برگردد. از طرفی با تنظیم مناسب شیب فرکانس دروپ سهم هر کدام از اینورترها ۲۰، ۳۰ و ۵۰ کیلووات می‌باشد که در شکل ۷ نشان داده شده است. از شیب فرکانس دروپ برای لحاظ کردن توان هر کدام از اینورترها استفاده می‌شود. از فرکانس نامی  $f_0$  برای کنترل شارش انرژی می‌توان استفاده کرد. فرکانس نامی اینورترها در این نمونه به مقدار ۵۰ هرتز تنظیم می‌شود. تنظیم کردن شیب ولتاژ دروپ، یک اندوکتانس مجازی متغیر بین اینورتر مربوطه و سیستم توزیع ایجاد می‌کند. این مقدار بایستی به گونه‌ای انتخاب گردد که بهره‌برداری پایدار سیستم را تضمین نماید. ولتاژ نامی بایستی به منظور به حداقل رساندن توان راکتیو تنظیم شود. در هر حال محدودیت ولتاژ بایستی لحاظ گردد.

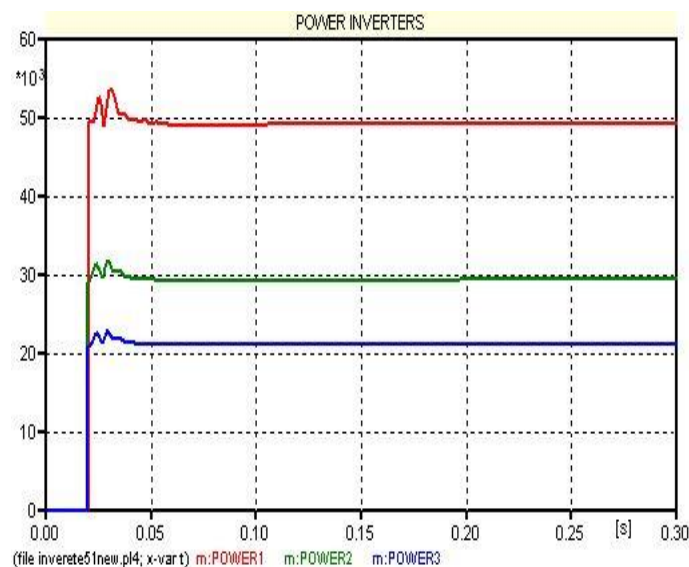


شکل ۵. مدار معادل ریزشکته مورد مطالعه



شکل ۶. شکل موج فرکانس اینورترها در حالت جزیره‌ای





شکل ۷. شکل موج توان تقسیم شده بین سه اینوتر

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله عملکرد کنترل کننده های محلی هوشمند ریز منابع در ریز شبکه مورد بررسی قرار گرفت. این کنترل کننده ها وظیفه کنترل فرکانس و ولتاژ در ریز شبکه را بر عهده داشته و برای بهره برداری پایدار شبکه ضروری می باشند. مفاهیم کنترل براساس دروپ های فرکانس-توان اکتیو و ولتاژ-توان راکتیو با هدف به کارگیری در ریز شبکه ها مورد بررسی قرار گرفت. این روش ها برای کنترل مبدل های استاتیکی متصل کننده ریز ژنراتورها به شبکه، مورد استفاده قرار گرفت. سپس توزیع توان در سیستم های جزیره ای توزیع شده، بررسی شد. در ادامه مفاهیم پارامترهای خط در انتخاب پارامترهای دروپ به طور سیستماتیک مورد مطالعه قرار گرفته است. در پایان، کنترل اینورتر با امپدانس ساختگی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. روش امپدانس ساختگی به عنوان یک روش مؤثر برای کنترل ولتاژ اینورترهای متصل شده به خطوط با مقاومت بالا و امپدانس پایین به اثبات رسید. تقسیم توان راکتیو می تواند با جبران سازی امپدانس خط بهبود یابد. به طور کلی بهره برداری پایدار برای ریز شبکه های تغذیه شده با ژنراتورهای متصل شده اینورتری نشان داده شد. در ضمن تقسیم توان و کنترل ولتاژ بین ژنراتورهای توزیع شده در ریز شبکه ها با به کارگیری کنترل کننده های محلی هوشمند و بهره مندی از مفاهیم کنترل دروپ سازمان دهی گردید.

#### منابع

- Augustine, S., Mishra, M. K., & Lakshminarasamma, N. (2014). Adaptive droop control strategy for load sharing and circulating current minimization in low-voltage standalone DC microgrid. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 6(1), 132-141.
- Barklund, E., Pogaku, N., Prodanovic, M., Hernandez-Aramburo, C., & Green, T. C. (2008). Energy management in autonomous microgrid using stability-constrained droop control of inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23(5), 2346-2352.
- Dragicevic, T., Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., & Skrlec, D. (2014). Supervisory control of an adaptive-droop regulated DC microgrid with battery management capability. *Power Electronics, IEEE Transactions* 29(2), 695-706.
- Han, H., Liu, Y., Sun, Y., Su, M., & Guerrero, J. M. (2014). An improved droop control strategy for reactive power sharing in islanded microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(6), 3133-3141.

- Kim, J., Guerrero, J. M., Rodriguez, P., Teodorescu, R., & Nam, K. (2010). Mode adaptive droop control with virtual output impedances for an inverter-based flexible AC microgrid. *IEEE Transactions on power electronics*, 26(3), 689-701.
- Mahmood, H., Michaelson, D., & Jiang, J. (2015). Decentralized power management of a PV/battery hybrid unit in a droop-controlled islanded microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(12), 7215-7229.
- Majumder, R., Chaudhuri, B., Ghosh, A., Majumder, R., Ledwich, G., & Zare, F. (2009). Improvement of stability and load sharing in an autonomous microgrid using supplementary droop control loop. *IEEE transactions on power systems*, 25(2), 796-808.
- Savaghebi, M., Jalilian, A., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M. (2012). Autonomous voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(4), 1390-1402.
- Vandoorn, T. L., Meersman, B., De Kooning, J. D., & Vandevelde, L. (2012). Analogy between conventional grid control and islanded microgrid control based on a global DC-link voltage droop. *IEEE transactions on power delivery*, 27(3), 1405-1414.