**دانشکده مهندسی برق**

**پایان‌نامه کارشناسی ارشد**

عنوان پایان‌نامه:

# کنترل توان اینورترهای موازی با استفاده از تکنیک Droop اصلاح شده

نگارش:

سعید گلستان ۸۵۱۲۳۰۲۵

استاد راهنما:

دکتر حسن رستگار

زمستان ۸۷

## تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله مراتب امتنان خود را به تمام عزیزانی که مرا در انجام این پایان‌نامه یاری نموده و محبت خود را دریغ ننمودند تقدیم می‌نمایم و نیز از حمایت‌ها و پشتیبانی‌های مستمر فکری و معنوی خانواده‌ام صمیمانه سپاسگزارم.

سعه صدر و راهنمایی‌های روشنگرانه و بی‌بدیل آقایان دکتر حسن رستگار و دکتر آرمان روشن سزاوار عالی‌ترین مراتب قدردانی است.

# چکیده

افزایش وابستگی زندگی مدرن امروز به تجهیزات الکتریکی و سیستم‌های کامپیوتری، نیاز به سیستم‌های تغذیه توان با قابلیت اعتماد بالا را ضروری ساخته است. این نیاز در مورد بارهای بحرانی از قبیل بیمارستان‌ها، سیستم‌های مخابراتی، مراکز اطلاعاتی و غیره بیشتر احساس می‌شود، به گونه‌ای که قطع تغذیه چنین بارهائی، خسارت‌های جبران‌ناپذیری را به همراه دارد. اطمینان از تداوم برق-رسانی به چنین بارهائی مستلزم بهره‌گیری از سیستم‌های تغذیه توان بدون وقفه (UPS) به عنوان واحد رزرو تغذیه‌کننده این بارها است. در این میان اتصال موازی UPSها دارای مزایائی از بعد قابلیت اعتماد، انعطاف‌پذیری در نصب، تعمیر و نگهداری و قابلیت توسعه می‌باشد. اما اتصال موازی آنها با مشکلاتی نیز همراه می‌باشد. مهمترین مشکل استفاده از واحدهای موازی، پیچیدگی سیستم کنترل آن‌ها است. در عملکرد موازی اینورترها، واحدها می‌بایست چنان کنترل شوند که ضمن اجتناب از اضافه بار آنها، شرایط مناسبی از نظر کیفیت توان برقرار باشد. با توجه به آنکه در عملکرد موازی UPSها، انتقال سیگنال‌های کنترلی بین آنها ممکن است بسیار سخت و یا با کاهش قابلیت اعتماد سیستم باشد، لذا کنترل واحدها باید بر اساس اطلاعاتی باشد که در محل آنها موجود است. این امر پیچیدگی بیشتر سیستم کنترل را موجب می‌شود.

علاوه بر سیستم‌های UPS، اتصال موازی اینورترها در منابع تولید پراکنده نیز مشاهده می‌شود. در سال‌های اخیر این منابع به علت ویژگی‌های اقتصادی و زیست‌محیطی خود، توجه بسیاری از محققین را به خود معطوف کرده‌اند و مفهومی تحت عنوان ریزشبکه (Microgrid) را پدید آورده‌اند. یک ریزشبکه به مجموعه‌ای از بارها، منابع تولید پراکنده و واحدهای ذخیره‌سازی انرژی اطلاق می-شود که عملکرد جمعی آنها باعث می‌شود قابلیت جذب یا انتقال انرژی به شبکه‌ای که بدان متصل است، را داشته باشد. یک ریزشبکه دارای دو شرایط عملکرد ۱) متصل به شبکه (the grid connected)، ۲) مستقل از شبکه (the islanded) است. در وضعیت اتصال به شبکه، اینورترها به گونه‌ای کنترل می‌شوند که توان ثابتی را تحویل دهند. در حالی‌که در وضعیت مستقل از شبکه، اینورترها به گونه‌ای کنترل می‌شوند که ضمن حفظ ولتاژ و فرکانس در محدوده مجاز، کل توان مورد نیاز بار را تامین کنند. بدیهی است که در این شرایط نیز توان تحویلی توسط هر اینورتر باید متناسب با ظرفیت نامی آن و بر اساس اطلاعاتی باشد که در محل آن اینورتر موجود است.

این پایان‌نامه مسالهٔ کنترل توان تعداد دلخواهی اینورتر با اتصال موازی و در وضعیت مستقل از شبکه را مورد بررسی قرار می‌دهد. طراحی سیستم کنترل برای اینورترها با فرض عدم امکان انتقال سیگنال‌های کنترلی بین واحدها صورت می‌گیرد، لذا از تکنیک Droop به عنوان اساس طراحی

سیستم کنترل بهره گرفته می‌شود. ایجاد قابلیت تقسیم توان هارمونیکی، جبرانسازی تاثیر نامطلوب عدم تساوی امپدانس خطوط بر تقسیم بار بین واحدها و نیز جبرانسازی تاثیر تلرانس واحدها بر تقسیم بار بین آنها اهداف اصلی طراحی سیستم کنترل را تشکیل می‌دهد. طراحی سیستم کنترل در دو وضعیت مختلف صورت می‌گیرد: ۱) شرایطی که امپدانس خطوط دارای طبیعت سلفی غالب باشد، ۲) شرایطی که امپدانس خطوط دارای طبیعت مقاومتی غالب باشد. پس از طراحی سیستم کنترل، نتایج شبیه سازی برای بارهای مختلف و در شرایط پایدار و گذرا ارائه می‌شود.

**کلمات کلیدی**: اینورتر (Inverter)، تولید پراکنده (Distributed Generation)، تکنیک افت ( Droop Technique)، تقسیم بار (Load Sharing)، اتصال موازی (Parallel Connection)، منبع تغذیه بدون وقفه (Uninterruptible Power Supply)

فهرست

فصل اول:مقدمه..... ۱
۱-۱- کاربرد اتصال موازی اینورترها..... ۲
۱-۲- روش موجود برای کنترل اتصال موازی اینورترها..... ۶
۱-۲-۱- تقسیم لحظه‌ای جریان با استفاده از روش Master/Slave..... ۶
۱-۲-۲- روش اختلاف از مقدار متوسط توان اکتیو/راکتیو..... ۹
۱-۲-۳- روش افت ولتاژ و فرکانس..... ۱۳
۱-۲-۴- روش تزریق سیگنال برای تقسیم جریان‌های هارمونیکی و جریان راکتیو..... ۱۷
۱-۳- هدف کلی تحقیق..... ۲۰
۱-۴- ترتیب ارائه مطالب..... ۲۲

فصل دوم: طراحی حلقه‌های داخلی ولتاژ و جریان برای اینورترهای تکفاز..... ۲۳
۲-۱- مقدمه..... ۲۴
۲-۲- توپولوژی اینورترهای منبع ولتاژی تکفاز..... ۲۵
۲-۳- طراحی فیلتر خروجی اینورتر..... ۲۸
۲-۴- تحلیل و طراحی حلقه‌های داخلی ولتاژ و جریان اینورترهای تکفاز..... ۳۰
۲-۴-۱- مدلسازی اینورتر تکفاز..... ۳۱
۲-۴-۲- طراحی سیستم کنترل با فیدبک جریان و ولتاژ خازن..... ۳۳
۲-۴-۲-۱- طراحی حلقه جریان..... ۳۳
۲-۴-۲-۲- طراحی حلقه ولتاژ..... ۳۷
۲-۴-۲-۳- شبیه‌سازی..... ۴۰
۲-۴-۳- طراحی سیستم کنترل با فیدبک ولتاژ خازن و جریان اندوکتانس..... ۴۲
۲-۴-۳-۱- طراحی حلقه جریان..... ۴۲
۲-۴-۳-۲- طراحی حلقه ولتاژ..... ۴۵
۲-۴-۳-۳- شبیه‌سازی..... ۴۷

فصل سوم: طراحی سیستم کنترل توان برای اینورترهای موازی در شبکه‌های با امپدانس عمدتاً سلفی ..... ۵۰
۳-۱- مقدمه..... ۵۱
۳-۲- عوامل تاثیرگذار بر تقسیم توان اکتیو و راکتیو بین اینورترها و جبرانسازی آنها..... ۵۱
۳-۲-۱- تاثیر تلرانس المان‌های فیلتر و عدم تعادل امپدانس خطوط بر تقسیم بار ..... ۵۱
۳-۲-۲- جبرانسازی عدم تعادل امپدانس خطوط و تلرانس پارامترهای فیلتر..... ۵۷
۳-۳- تقسیم جریان‌های هارمونیکی..... ۶۴

۳-۳-۱- استخراج مولفه اصلی و مولفه‌های هارمونیکی جریان..... ۶۴
۳-۳-۲- الگوریتم محاسبه توان هارمونیکی..... ۷۹
۳-۳-۳- تکنیک تقسیم توان هارمونیکی..... ۸۲
۳-۴- شبیه‌سازی..... ۸۵
۳-۴-۱- واحدهای موازی با ظرفیت یکسان..... ۸۵
۳-۴-۱-۱- بار خطی..... ۸۵
۳-۴-۱-۱-۱- امپدانس خطوط متعادل..... ۸۵
۳-۴-۱-۱-۲- امپدانس خطوط نامتعادل..... ۸۷
۳-۴-۱-۲- بار غیرخطی..... ۸۹
۳-۴-۱-۳- عملکرد گذرا..... ۹۳
۳-۴-۲- واحدهای موازی با ظرفیت غیریکسان..... ۹۵
۳-۴-۳- مقایسه نتایج سبیه‌سازی با مقالات دیگر..... ۹۸
فصل چهارم: طراحی سیستم کنترل توان برای اینورترهای موازی در شبکه‌های کابلی..... ۱۰۰
۴-۱- مقدمه..... ۱۰۱
۴-۲- کنترل توان اینورترها با استفاده از تکنیک Droop مقاومتی..... ۱۰۴
۴-۳- شبیه‌سازی..... ۱۰۶
۴-۴- مشکلات تکنیک Droop مقاومتی و راه‌کارهای رفع آن‌ها..... ۱۱۲
۴-۵- پاسخ گذرا تکنیک Droop..... ۱۱۹
۴-۵-۱- عوامل کندی پاسخ گذرای تکنیک Droop..... ۱۱۹
۴-۵-۲- بهبود پاسخ گذرا..... ۱۱۹
۴-۵-۳- بهینه سازی پاسخ گذرا با استفاده از الگوریتم ژنتیک..... ۱۲۳
۴-۶- نتایج شبیه‌سازی..... ۱۲۸

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی..... ۱۳۳
۵-۱- نتیجه‌گیری..... ۱۳۴
۵-۲- پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی..... ۱۳۶

ضمیمه A: طراحی گسسته-زمانی فیلتر کالمن..... ۱۳۷
ضمیمه B- طراحی PLL..... ۱۴۲

**مراجع**..... ۱۴۸

# فصل اول

## مقدمه

## ۱-۱- کاربردهای اتصال موازی اینورترها

افزایش وابستگی زندگی مدرن امروز به تجهیزات الکتریکی و سیستم‌های کامپیوتری، نیاز به سیستم‌های تغذیه توان با قابلیت اعتماد بالا را ضروری ساخته است. این نیاز در مورد بارهای بحرانی از قبیل بیمارستان‌ها، سیستم‌های مخابراتی، سیستم‌های حفاظتی، مراکز اطلاعاتی و غیره بیشتر احساس می‌شود به گونه‌ای که قطع تغذیه چنین بارهائی خسارت‌های جبران‌ناپذیری را به همراه دارد[۲] ,[۱].

ساختارهای قدرت کنونی (اعم از تولید، انتقال و توزیع) نیز به دلیل مشکلاتی، که به شرح آن خواهیم پرداخت، قادر نمی‌باشند قابلیت اعتماد مورد نیاز این بارها (بارهای بحرانی) را فراهم آورند. علت آن است که وقوع خطا و خاموشی‌های برنامه‌ریزی شده یا برنامه‌ریزی نشده در این سیستم‌ها، به خصوص در کشورهای جهان سوم، امری نسبتاً متداول است[۳]. علاوه بر مسئله قابلیت اعتماد، مسئله کیفیت توان نیز هنوز به سطح مطلوب خود که سازگار با تجهیزات مدرن و حساس زندگی امروز باشد، نرسیده است. روند رو به رشد استفاده از بارهای مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت، کامپیوترها و دیگر بارهای الکترونیکی حساس، مسئله کیفیت توان را به یکی از مهمترین موضوعات تبدیل کرده است. در این میان یکی از عمده‌ترین اغتشاشاتی که مشکلات کیفیت توان را موجب می‌شوند، مسئله افت ولتاژ است به گونه‌ای که بیش از ۹۲ درصد از اغتشاشات منجر به مشکلات کیفیت توان به این مسئله نسبت داده می‌شود[۴]. هر چند به طور دقیق نمی‌توان خسارتی را که در نتیجه شرایط ضعیف کیفیت توان ایجاد می‌شود، تعیین کرد اما تخمین زده می‌شود این خسارت فقط در آمریکا حدود یکصد میلیون دلار در سال باشد[۵]. مشکلات مذکور بهره‌گیری از یک سیستم تغذیه پشتیبان برای بارهائی بحرانی را ضروری می‌سازد. دیزل ژنراتورها و منابع تغذیه قطع نشدنی($UPS$[۱]) گزینه‌های موجود برای این امر هستند. در این میان دیزل ژنراتورها دارای مشکلاتی از قبیل سرعت راه‌اندازی پائین[۶] و محتوای هارمونیکی بالا هنگام تغذیه بارهای شدیداً غیرخطی هستند[۷]. لذا چنین به نظر می‌رسد که استفاده از UPS بهترین گزینه برای دستیابی به شرایط قابلیت اعتماد و کیفیت توان مورد نیاز بارهای بحرانی باشد.

عملکرد هماهنگ سیستم UPS همراه با شبکه اصلی، تداوم برقرسانی به بارهای بحرانی را تضمین می‌کند. در شرایطی که شبکه اصلی برقرار است، توان مورد نیاز بار از طریق شبکه تامین می‌شود. به محض قطع شبکه یا ایجاد مشکلاتی در کیفیت توان آن، اتصال بار از شبکه قطع شده و UPS تغذیه بار را بر عهده می‌گیرد. سوالی که معمولاً در استفاده از UPS به عنوان واحد پشتیبان بارهای بحرانی مطرح است پرسش درباره بهره‌گیری از یک UPS با ظرفیت بالا یا استفاده از تعدادی واحد موازی با ظرفیت پائین‌تر است. در پاسخ به این پرسش باید

---

[۱] uniterruptable power supply

بگوئیم که هر یک از این دو ساختار دارای مزایا و معایب مربوط به خود می‌باشند و انتخاب یکی از این دو روش به درجه قابلیت اعتماد موردنیاز، فضای نصب و مسائل تعمیر و نگهداری آنها بستگی دارد. معمولاً استفاده از یک UPS بزرگ از نظر اقتصادی به‌صرفه‌تر از استفاده از تعدادی UPS کوچکتر با همان ظرفیت است[۸]. اما استفاده از UPS های موازی دارای مزایائی از بعد قابلیت اعتماد، انعطاف‌پذیری در نصب، تعمیر و نگهداری و قابلیت توسعه می‌باشد که در ادامه به توضیح مختصری در باره آن می‌پردازیم.

- قابلیت اعتماد: عملکرد موازی اینورترها قابلیت اعتماد سیستم تغذیه را به شدت افزایش می‌دهد. چنانچه یکی از واحدها به هر دلیلی از مدار خارج شود بقیه واحدها تداوم برقرسانی را تضمین می‌کنند.
- قابلیت توسعه: افزایش نیاز به توان در ساختارهای موازی به سادگی با افزودن واحدی به واحدهای موازی مرتفع می‌گردد.
- تعمیر و نگهداری: مسئله تعمیر و نگهداری در واحدهای موازی با سهولت بیشتری نسبت به واحد متمرکز همراه است.

مهمترین مشکل استفاده از واحدهای موازی، پیچیدگی سیستم کنترل آن‌ها است. در عملکرد موازی اینورترها، واحدها می‌بایست چنان کنترل شوند که از اضافه بار آنها جلوگیری شود و شرایط مناسبی از نظر کیفیت توان برقرار باشد. با توجه به آنکه واحدهای موازی ممکن است در نقاط مختلفی از شبکه و در فواصل دور از هم مستقر باشند لذا انتقال سیگنال‌های کنترلی بین آنها ممکن است بسیار سخت و یا با کاهش قابلیت اعتماد سیستم همراه باشد. لذا کنترل واحدها باید بر اساس اطلاعاتی باشد که در محل واحدها موجود است. این امر پیچیدگی بیشتر سیستم کنترل را موجب می‌شود.

اما عملکرد موازی اینورترها صرفاً منحصر به سیستم‌های UPS نیست بلکه کاربرد آن در سیستم‌های تولید پراکنده نیز مشاهده می‌شود. در سال‌های اخیر به علت مزایای زیست محیطی و اقتصادی، توجه خاصی به توسعه و کاربرد منابع انرژی پاک و سیستم‌های تولید پراکنده معطوف شده است مشخصه اصلی منابع تولید پراکنده که آنها را از نیروگاه‌های مرسوم متمایز می‌سازد، موقعیت و ظرفیت توانی آنهاست. بر خلاف نیروگاه-های برق که به خطوط انتقال فشار قوی متصل هستند، منابع تولید پراکنده در یک محدوده جغرافیائی پراکنده بوده و به یک شبکه محلی، تحت عنوان Microgrid، متصل هستند. در چنین سیستمی به علت فاصله زیاد بین منابع تولید پراکنده، هر واحد می‌بایست عملکرد مستقلی از سایر واحدها داشته باشد و ضمن حفظ ولتاژ و فرکانس خروجی خود در محدوده مجاز، توانی متناسب با ظرفیت نامی خود تحویل دهد.

شکل ۱-۱ ساختار کلی یک Microgrid را نشان می‌دهد که متشکل از تعداد دلخواهی منبع تولید پراکنده، بارهای پراکنده و مبدل‌های الکترونیک قدرت است. مبدل‌های الکترونیک قدرت وظیفه انتقال انرژی به بارهای

پراکنده و شبکه را بر عهده دارند. اصولاً اینورترها در یک Microgrid دو وضعیت عملکرد کاملاً متمایز دارند: عملکرد متصل به شبکه و عملکرد مستقل از شبکه.

در وضعیت اتصال به شبکه، منابع تولید پراکنده به صورت منابع توان ثابت عمل می‌کنند به عبارت دیگر این منابع به گونه‌ای کنترل می‌شوند که توان ثابتی را به شبکه تحویل دهند. در وضعیت مستقل از شبکه، که مسئله مورد بحث ما است، این منابع به گونه‌ای کنترل می‌شوند که ضمن حفظ ولتاژ و فرکانس در محدوده مجاز، کل توان مورد نیاز بار را تامین کنند. اصولاً عملکرد مستقل از شبکه یک Microgrid ممکن است به یکی از دلایل زیر رخ دهد:

- عملکرد مستقل از شبکه به علت تعمیر و نگهداری یا مسائل اقتصادی. در اصطلاح به آن جزیره‌سازی از پیش برنامه‌ریزی شده می‌گویند.
- عملکرد مستقل از شبکه به علت وقوع خطا در شبکه اصلی. در اصطلاح به آن جزیره‌سازی برنامه‌ریزی نشده می‌گویند.

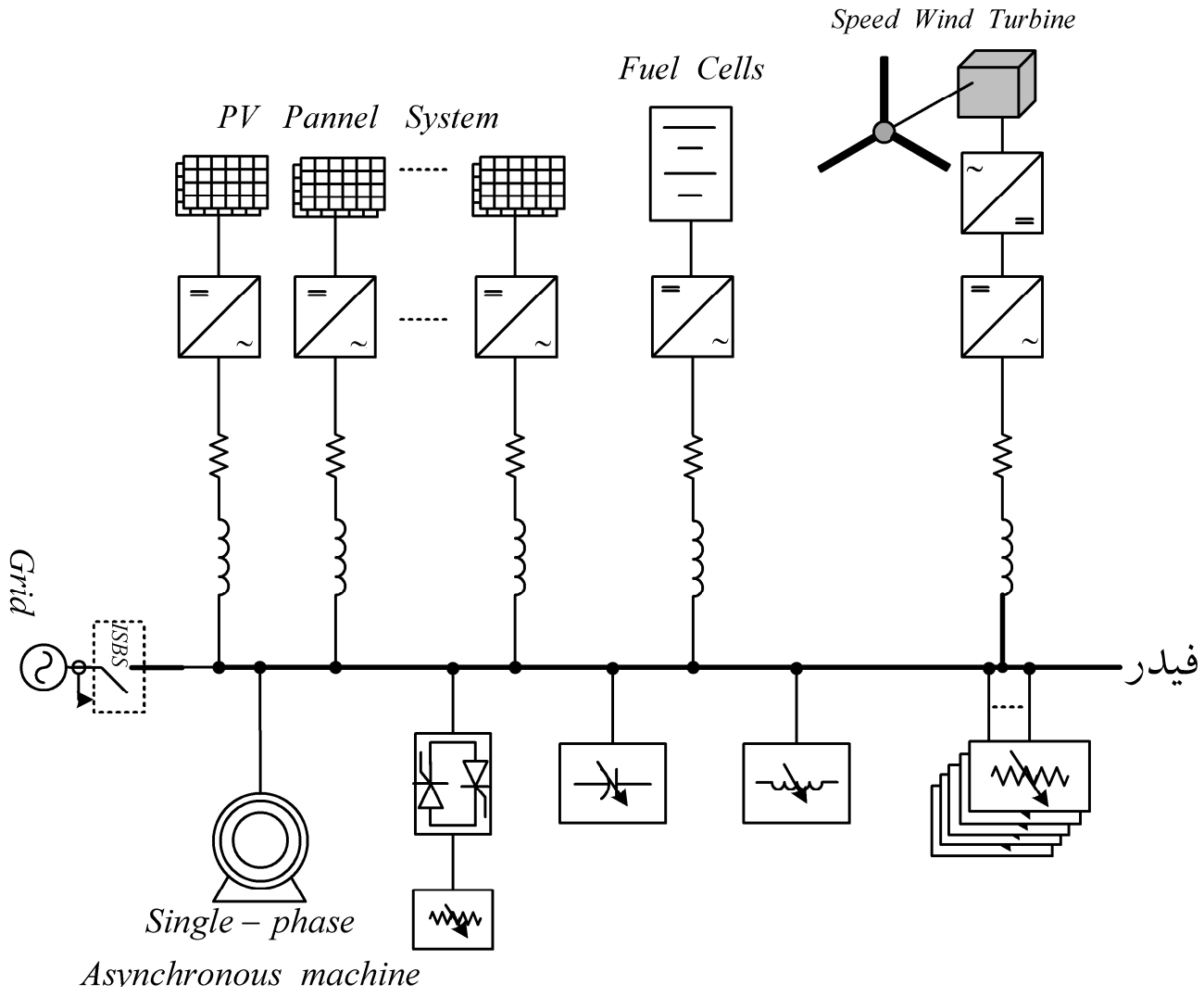
عملکرد مستقل از شبکه با بازشدن کلید ایزوله کننده تحقق پیدا می‌کند (به شکل ۱-۱ توجه کنید) همین‌که Microgrid از شبکه اصلی جدا شد، منابع تولید پراکنده در ضمن تامین کل توان بار، وظیفه دارند ولتاژ و فرکانس را در محدوده مجاز نگه دارند.

عملکرد صحیح سیستمی که متشکل از $n$ اینورتر موازی (با ظرفیت یکسان) است، مستلزم چهار ویژگی اساسی زیر است:

۱. برابری دامنه ولتاژ، فرکانس و زاویه فاز واحدها
۲. تقسیم یکسان جریان بین واحدها
۳. انعطاف‌پذیری در افزایش تعداد واحدها
۴. قابلیت عملکرد hot-swap

مفهوم hot-swap به معنی امکان ورود/ خروج هر اینورتر به/از مدار بدون ایجاد اغتشاش قابل توجه در جریان خروجی واحدها و شرایط کیفیت توان شبکه است. لذا سیستم کنترل طراحی شده می‌بایست شرایط فوق را به همراه داشته باشد.

در ادامه بحث به بررسی روش‌های موجود برای کنترل اینورترهای موازی می‌پردازیم.




شکل ۱-۱: ساختار کلی یک Microgrid

## ۱-۲- روش‌های موجود برای کنترل اینورترهای موازی

.روش‌های موجود به چهار گروه تقسیم می‌شوند:

۱. تقسیم لحظه‌ای جریان با بهره‌گیری از روش Master/Slave [۹-۱۴]

۲. روش اختلاف از مقدار متوسط توان اکتیو/راکتیو [۱۵-۱۹]

۳. روش افت ولتاژ و فرکانس [۲۰-۳۰]

۴. روش تزریق جریان برای تقسیم جریان‌های هارمونیکی و راکتیو [۳۱-۳۲]

### ۱-۲-۱- تقسیم لحظه‌ای جریان با استفاده از روش Master/Slave [۹-۱۴]

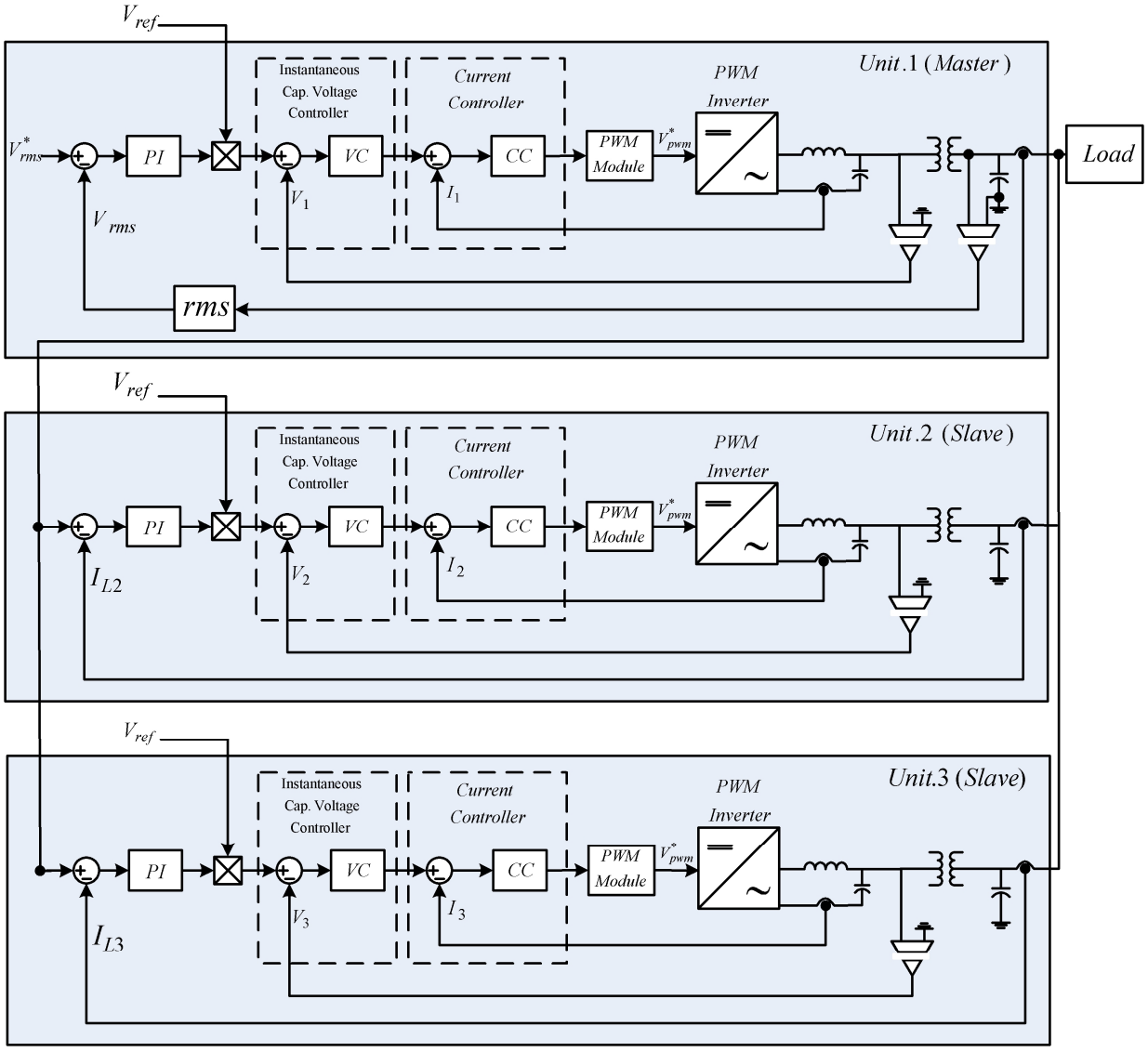
تکنیک تقسیم لحظه‌ای جریان، تکنیک تقسیم باری است که به منظور تقسیم یکسان بار بین واحدهای موازی، جریان بار را به عنوان سیگنال فیدبک به واحدهای موازی مورد استفاده قرار می‌دهد. در این تکنیک یکی از اینورترها به عنوان کنترلر حاکم (Master) عمل می‌کند که مسئولیت ایجاد و تثبیت ولتاژ مورد نیاز بار را بر عهده دارد و دیگر اینورترها به عنوان کنترلرهای تابع (Slave) عمل می‌کنند و سعی خواهند کرد خروجی جریانشان را با سیگنال فیدبک شده جریان بار منطبق کنند.

شکل ۱-۲ دیاگرام بلوکی تکنیک تقسیم لحظه‌ای بار، که در مراجع [۹] و [۱۰] شرح داده شده، را نشان می‌دهد. در شکل۱-۲ هر واحد متشکل از یک اینورتر PWM همراه با فیلتر LC خروجی و ترانسفورماتور است. هر اینورتر مجهز به یک رگولاتور ولتاژ، که وظیفه تنظیم ولتاژ خازن را بر عهده دارد، و نیز یک حلقه داخلی کنترل جریان می‌باشد.

واحد شماره ۱ به عنوان کنترلر حاکم (Master) عمل می‌کند و وظیفه آن تثبیت ولتاژ مورد نیاز بار بر اساس مرجع ولتاژ است. در کاربرد UPS ها، مرجع ولتاژ معمولاً یا با یک ولتاژ AC خارجی (ولتاژ شبکه) یا با سیگنال تولید شده توسط نوسان‌ساز داخلی کنترلر، سنکرون می‌شود.

کنترلر حاکم (Master) به منظور تنظیم ولتاژ بار، شامل یک حلقه خارجی کنترل مقدار موثر ولتاژ است. در این واحد، دامنه ولتاژ مرجع با بهره‌گیری از یک کنترلر PI و خطای مقدار موثر ولتاژ تنظیم می‌شود. جریان خروجی تولید شده به وسیله واحد حاکم (Master) به واحدهای تابع (Slave) فیدبک می‌شود. واحدهای تابع (Slave) پس از دریافت این سیگنال سعی خواهند کرد جریان خروجی خود را برابر با جریان خروجی واحد

حاکم کنند. این امر با در نظر گرفتن یک حلقه خارجی جریان بار برای واحدهای تابع (Slave) امکان پذیر می-شود

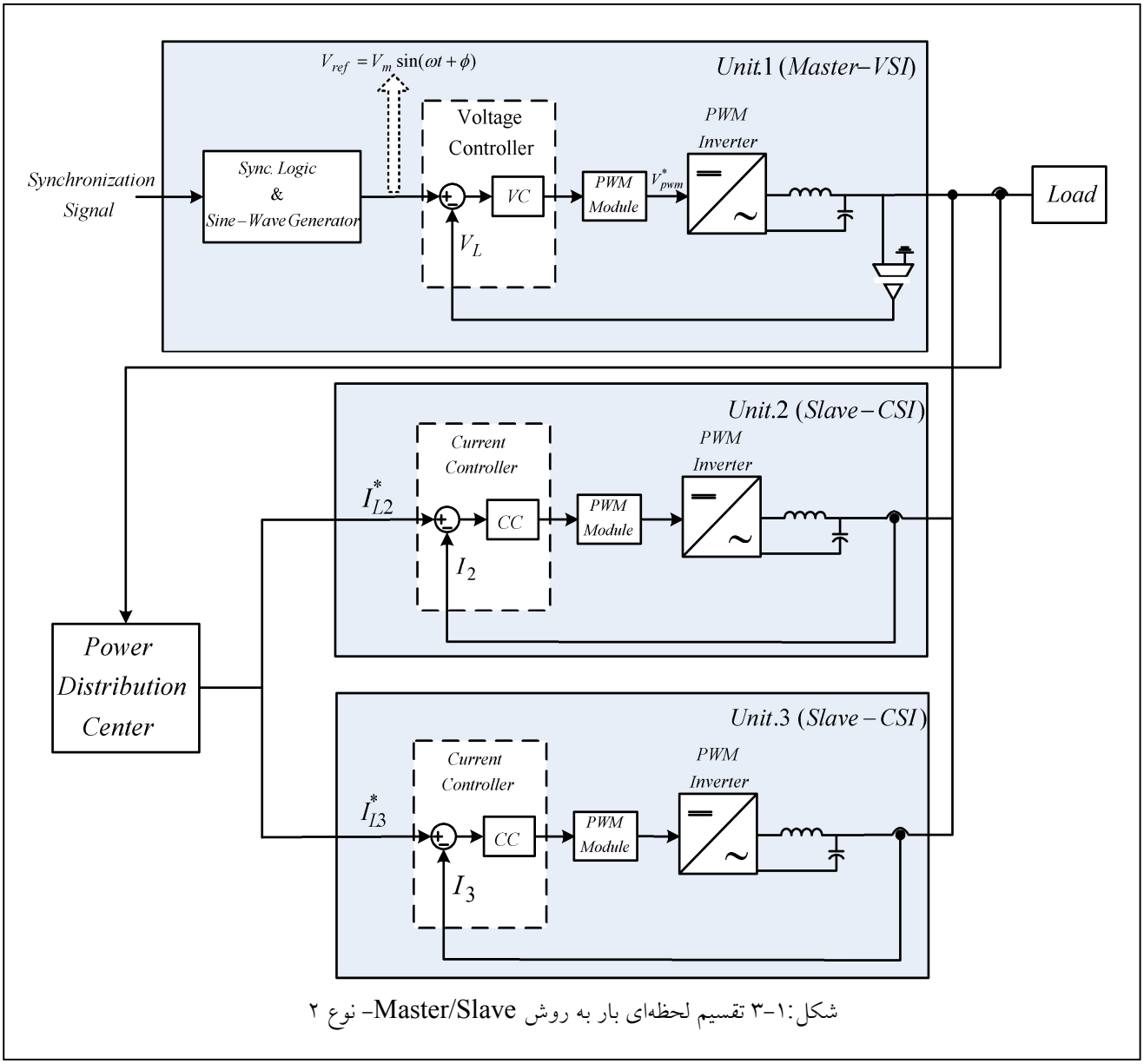



شکل۱-۲ تقسیم لحظه‌ای بار به روش Master/Slave- نوع ۱

توجه کنید که در ساختار کنترلی نشان داده شده در شکل ۱-۲ لازم است مرجع ولتاژ به تمام واحدها اعمال شود. ضرورت این امر، لزوم تولید ولتاژهای سنکرون در خروجی واحدهاست. این امر به معنی لزوم تجهیز کلیه واحدها به یک حلقه قفل شده در فاز (PLL[۲]) به منظور سنکرونیزاسیون با مرجع ولتاژ است.

[۲] Phase locked loop

لزوم بهره‌گیری از PLL در تمام واحدها با استفاده از روش ارائه شده در [۱۱] حذف می‌شود. برای این منظور از اینورترهای منبع جریانی در واحدهای Slave استفاده می‌شود. شکل ۱-۳ ساختار کنترلی ارائه شده در [۱۱] را نشان می‌دهد.




شکل:۱-۳ تقسیم لحظه‌ای بار به روش Master/Slave- نوع ۲

واحد حاکم (Master)، اینورتری منبع ولتاژی است که به حلقه کنترل ولتاژ ساده‌ای مجهز می‌باشد. وظیفه این واحد، چنانچه پیش از این نیز ذکر شد، ایجاد و تثبیت ولتاژ مورد نیاز بار است. واحدهای تابع (Slave)، اینورترهائی منبع جریانی هستند که مرجع جریان آنها توسط واحدی به نام "مرکز توزیع توان" ایجاد می‌شود.

این واحد جریان کل بار را اندازه‌گیری کرده و سیگنال‌هائی متناسب با ظرفیت نامی واحدهای تابع (Slave) به عنوان مرجع جریان آنها تولید می‌کند. هر واحد تابع (Slave) جریان خروجی خود را متناسب با سیگنال مرجع دریافتی از "مرکز توزیع توان" تنظیم می‌کند.

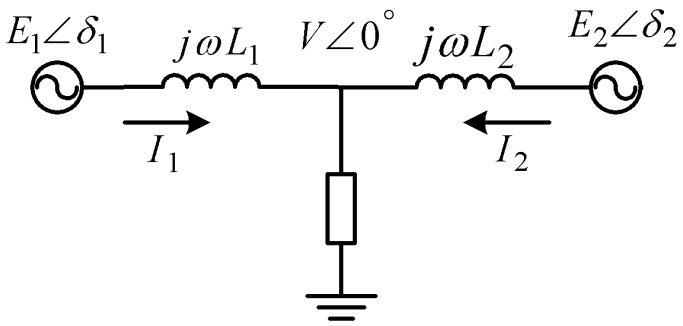
انواع دیگری از تکنیک Master/Slave نیز وجود دارد که در مراجع [۱۲-۱۴] ارائه شده‌اند.

مزیت اصلی تکنیک تقسیم لحظه‌ای بار، تقسیم بار آنی بین واحدهای موازی است. عدم نیاز به اندازه گیری جریان بار(نوع ۱) مزیت دیگری است که تسهیل توسعه و گسترش سیستم را موجب می‌شود. از دیگر مزایای این روش عدم تاثیر امپدانس خطوط بر تقسیم بار بین واحدهاست.

نیاز به واحدی به عنوان واحد حاکم (Master) یکی از نقطه ضعف‌های اساسی این روش محسوب می-شود که کاهش قابلیت اعتماد سیستم را موجب می‌شود. علت آن است در صورت وقوع خطا در واحد Master، کل سیستم از مدار خارج می‌شود. اخیراً گام‌هائی به منظور برطرف ساختن این مشکل برداشته شده است. به این صورت که با خارج شدن واحد Master از مدار(به هر علتی)، یکی از واحدهای Slave جایگزین آن می‌شود و تداوم انتقال توان حفظ می‌شود. بدیهی است که این کار پیچیدگی سیستم کنترل و افزایش هزینه‌ها را در مقایسه با سیستم‌های Master/Slave متداول به همراه دارد. به علاوه نیاز به سیم کشی بین واحدهای از دیگر مشکلات این تکنیک است که کاهش قابلیت اعتماد سیستم را موجب می‌شود.

### ۱-۲-۲- روش اختلاف از مقدار متوسط توان اکتیو/راکتیو [۱۵-۱۹]

این تکنیک تقسیم بار بر اساس تئوری پخش بار در سیستم‌های AC طراحی شده است. در این تکنیک فرض بر این است که امپدانس خطوط عمدتاً اندوکتیو است لذا شارش توان اکتیو را عمدتاً تابعی از زاویه توان و شارش توان راکتیو را عمدتاً تابعی از دامنه ولتاژ در نظر می‌گیرند[۳۳]. شکل ۱-۴ اتصال موازی دو اینورتر را نشان می‌دهد که هر یک توسط امپدانس خطی، که جهت سادگی اندوکتیو فرض شده، به بار مشترکی وصل شده‌اند.




شکل ۱-۴: اتصال موازی دو اینورتر متصل به یک بار مشترک

توان مختلط تزریقی به بار توسط اینورتر۱ عبارت است از:

$$S_1 = P_1 + jQ_1 = V.I_1^* \qquad (۱-۱)$$

که در آن $I_1^*$ مزدوج مختلط جریان اینورتر۱ است و با رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$I_1^* = \left[\frac{E_1\cos\delta_1 + jE_1\sin\delta_1 - V}{j\omega L_1}\right]^* \qquad (۱-۲)$$

با ترکیب روابط (۱-۱) و (۱-۲) داریم

$$S_1 = V.\left[\frac{E_1\cos\delta_1 + jE_1\sin\delta_1 - V}{j\omega L_1}\right]^* \qquad (۱-۳)$$

با استفاده از رابطه (۱-۳)، روابط مربوط به توان اکتیو و راکتیو تزریقی توسط اینورتر۱ به بار را به سادگی می‌توان بدست آورد.

$$P_1 = \frac{VE_1}{\omega L_1}\sin\delta_1 \qquad (۱-۴)$$

$$Q_1 = \frac{VE_1 \cos\delta_1 - V^2}{\omega L_1} \qquad (۵-۱)$$

به طور مشابه برای اینورتر دوم داریم

$$P_2 = \frac{VE_2}{\omega L_2} \sin\delta_2 \qquad (۶-۱)$$

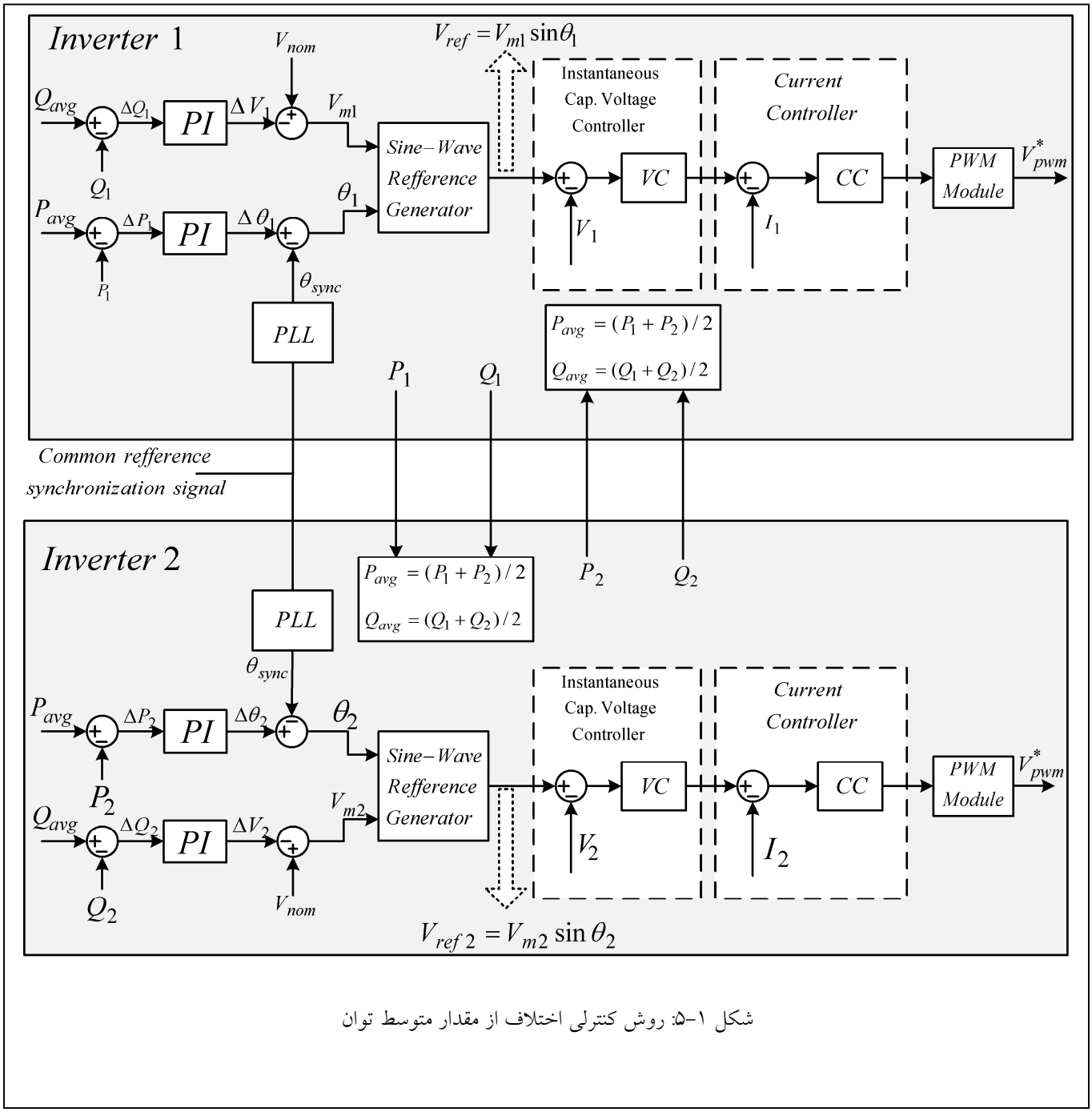
$$Q_2 = \frac{VE_2 \cos\delta_2 - V^2}{\omega L_2} \qquad (۷-۱)$$

با توجه به روابط (۱-۴) تا (۱-۷) مشاهده می‌شود چنانچه $\delta_1$ و $\delta_2$ به اندازه کافی کوچک باشند، شارش توان اکتیو عمدتاً متاثر از زوایای توان $\delta_1$ و $\delta_2$ است در حالی که شارش توان راکتیو عمدتاً وابسته به ولتاژ خروجی اینورترها یعنی $E_1$ و $E_2$ است. این امر نشان‌دهنده آن است که شارش توان اکتیو و راکتیو تقریباً به صورت مستقل از هم قابل کنترل است.

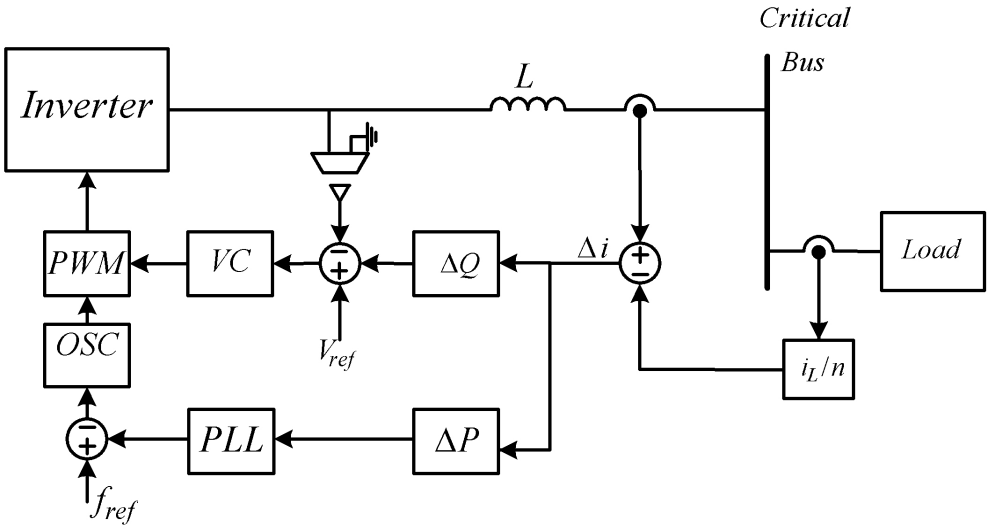
شکل ۱-۵ دیاگرام بلوکی این تکنیک تقسیم بار را برای دو اینورتر موازی نشان می‌دهد. در این روش هر اینورتر با تنظیم مرجع ولتاژ درونی خود می‌کوشد توان اکتیو و راکتیو خروجی آن با مقدار میانگین توان اکتیو و راکتیو مطابقت داشته باشد. به منظور آگاهی هر واحد از مقدار متوسط توان، توان اکتیو و راکتیو هر واحد می‌بایست به واحدهای دیگر ارسال شود. در مراجع [۱۵-۱۷] ، توان اکتیو و راکتیو هر واحد با تجزیه جریان بار آن واحد به مولفه‌های اکتیو و راکتیوش، حاصل می‌شود.

در مراجع [۱۸-۱۹] روش دیگری برای تقسیم بار پیشنهاد شده است. در این روش جریان کل بار اندازه‌گیری شده و بر تعداد واحدها تقسیم می‌شود تا مرجعی برای جریان تحویلی توسط هر واحد باشد. اختلاف جریان هر واحد از این مرجع محاسبه شده و از روی آن اختلاف توان اکتیو و راکتیو واحد از مقدار میانگین محاسبه می‌شود. اختلاف توان اکتیو برای تنظیم زاویه فاز ولتاژ و اختلاف توان راکتیو جهت تنظیم دامنه ولتاژ به کار برده می‌شود. شکل ۱-۶ دیاگرام بلوکی این تکنیک کنترلی را نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه در این روش نیازی به واحدی به عنوان Master وجود ندارد قابلیت اعتماد این تکنیک نسبت به روش Master/Slave بیشتر است. از دیگر مزایای این تکنیک تقسیم بسیار خوب توان اکتیو و راکتیو بین واحدهاست که منجر به کاهش جریان‌های چرخشی بین واحدها می‌شود.




شکل ۱–۵: روش کنترلی اختلاف از مقدار متوسط توان




شکل۱-۶: دیاگرام بلوکی کنترل انحراف توان

یکی از نقاط ضعف این تکنیک آن است که این تکنیک فقط مولفه اصلی جریان بار را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این صورت چنانچه بار غیرخطی باشد، این تکنیک قادر به تقسیم صحیح جریان‌های هارمونیکی بین واحدها نمی‌باشد. نیاز به لینک ارتباطی بین واحدها، نقطه ضعف دیگر این تکنیک است که کاهش قابلیت اعتماد سیستم را به همراه دارد.

### ۱-۲-۳- روش افت ولتاژ و فرکانس [۲۰-۳۰]

این تکنیک از فلسفه‌ای مشابه با آنچه در سیستم‌های قدرت چند ژنراتوری جهت تقسیم بار به کار گرفته می‌شود، بهره می‌جوید. در واقع ایده اصلی این تکنیک تقلیدی از رفتار گاونر ژنراتورهای سنکرون است. در سیستم‌های قدرت، ژنراتورهای سنکرون هر تغییری در بار را با افت فرکانس خود متناظر با مشخصه افت (Droop) گاورنرشان تقسیم می‌کنند. این امر این امکان را فراهم می‌سازد که ژنراتورهای سنکرون به تغییرات بار به گونه‌ای پیش‌بینی شده عکس‌العمل نشان دهند و از فرکانس سیستم به عنوان لینک ارتباطی بین سیستم‌های کنترل خود بهره گیرند[۲۱].

این تکنیک در اینورترها با کاهش فرکانس مرجع اینورتر به عنوان تابعی از توان اکتیو خروجی آن، قابل پیاده‌سازی است. به گونه‌ای مشابه تقسیم توان راکتیو بین اینورترها با کاهش دامنه ولتاژ خروجی اینورتر به

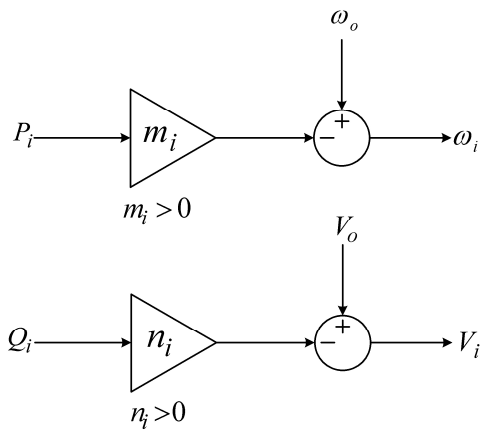
عنوان تابعی از توان راکتیو خروجی آن قابل دستیابی است. توجه کنید که در این تکنیک امپدانس خطوط سلفی فرض می‌شود، بنابراین کنترل توان اکتیو با کنترل فرکانس و کنترل توان راکتیو با کنترل دامنه ولتاژ صورت می-گیرد.

در تکنیک Droop، مشخصه افت $P-\omega$ و مشخصه افت $Q-V$ اینورتر $i$ام در سیستمی متشکل از چندین اینورتر موازی با روابط زیر توصیف می‌شود:

$$\omega_i = \omega_o - m_i P_i \qquad (۸-۱)$$

$$V_i = V_o - n_i Q_i \qquad (۹-۱)$$

که $\omega_i$ و $V_i$ به فرکانس زاویه‌ای و ولتاژ خروجی اینورتر $i$ام اشاره دارند، $\omega_o$ و $V_o$ نشان دهنده فرکانس-زاویه‌ای و ولتاژ نامی سیستم هستند، $m_i$ و $n_i$ به ترتیب ضرائب افت فرکانس و ولتاژ می‌باشند. شکل ۱-۷ دیاگرام بلوکی تکنیک افت ولتاژ و فرکانس را نشان می‌دهد.




شکل ۱-۷:تکنیک افت (Droop) ولتاژ و فرکانس

به منظور آنکه تقسیم بار بین اینورترها متناسب با ظرفیت نامی آنها باشد شیب مشخصه‌های Droop چنان انتخاب می‌شود که

$$m_1 S_1 = m_2 S_2 = .... = m_n S_n \qquad (۱۰-۱)$$