تشکر و قدردانی

رسول‌الله صلی‌الله علیه و آله: لا یشکر الله من لایشکر النّاس

شکر خدا را بجا نیاورده است آنکه از مردم (در قبال انعامشان) تشکر نکند.

حمد و سپاس خدای بلندمرتبه را که توفیق کسب دانش و معرفت را به ما عطا فرمود. در اینجا برخود لازم میدانم از تمامی اساتید بزرگوار به‌ویژه اساتید دوره کارشناسی ارشد و پدر و مادر دلسوزم که مرا در تحصیل علم و معرفت و فضایل اخلاقی یاری نموده‌اند تقدیر و تشکر نمایم.

از استاد گرامی و بزرگوار جناب آقای **دکتر سید عباس طاهر** ریاست محترم دانشکده مهندسی برق که راهنمایی این‌جانب را در انجام تحقیق، پژوهش و نگارش این پایان‌نامه تقبل نموده‌اند نهایت تشکر و سپاسگزاری را دارم.

از تشریک‌مساعی **آقای دکتر حمیدرضا محمدی و آقای دکتر بابک گنجی** بعنوان اساتید داور که این پایان‌نامه را مورد مطالعه قرار داده و در جلسه دفاعیه شرکت نموده‌اند تشکر می‌نمایم.

دانشگاه کاشان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گروه مهندسی برق- قدرت

پایان‌نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی برق- قدرت

عنوان:

جبران‌سازی بهینه‌ی توان راکتیو در میکروشبکه‌ی نامتعادل

استاد راهنما:

آقای دکتر سید عباس طاهر

توسط:

علی سالاری

آذر ماه ۱۳۹۲

چکیده

مسئله‌ی جبران‌سازی توان راکتیو یکی از مهمترین موضوعاتی است که در سیستم‌های قدرت مطرح می‌باشد. بارهای موجود در میکروشبکه، نیاز به یک جریان سینوسی غیرهمفاز با ولتاژ دارند. به عبارت دیگر می‌توان گفت که بارها علاوه بر توان اکتیو به توان راکتیو نیز نیاز دارند. توان راکتیو، یک توان فیزیکی حقیقی نیست به عبارتی هیچ تبدیل انرژی و مصرف سوختی برای تولید آن نیاز نمی‌باشد. همانند عبور توان اکتیو از خطوط، عبور توان راکتیو نیز باعث ایجاد تلفات و افت ولتاژ می‌شود. با توجه به رشد روزافزون استفاده از تولیدات پراکنده و بهره‌گیری از سیستم‌های توزیع هوشمند که نیاز اساسی شبکه‌های قدرت می‌باشند، استفاده از روشی مناسب به منظور جبراسازی بهینه توان راکتیو در این شبکه‌ها مورد نیاز می‌باشد.

الگوریتم‌های بهینه‌سازی توزیع شده برای این منظور مناسب می‌باشند که اکثر آنها جهت جبران‌سازی توان راکتیو به صورتی عمل می‌کنند که بخش‌های یک الگوریتم بهینه‌سازی بزرگ را به واحدهای پردازش مختلف ارسال می‌کنند که در این صورت نیاز به داشتن اطلاعات کل سیستم و مانیتورینگ آن می‌باشد. در این پایان‌نامه مسئله‌ی جبران‌سازی بهینه‌ی توان راکتیو در یک میکروشبکه‌ی هوشمند و نامتعادل برای به حداقل رساندن تلفات توان مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا یک مدل مناسب برای میکروشبکه و نیز مدل تقریبی از آن ارائه شده و سپس تابع تلفات سیستم به صورت یک مسئله‌ی بهینه‌سازی که متغیرهای تصمیم‌گیری در آن مقادیر توان راکتیو تزریقی توسط جبران‌کننده‌های موجود در میکروشبکه می‌باشند، تعریف شده است. مسئله‌ی بهینه‌سازی به زیرمسئله‌های بهینه‌سازی که برای حل آنها نیاز به اطلاعات جزئی و محلی از سیستم می‌باشد، تبدیل می‌شوند. با کلاستربندی (خوشه‌بندی) جبران‌کننده های موجود در شبکه و طراحی الگوریتم توزیع شده تصادفی و نیز تعیین شرایط همگرایی آن، اقدام به حل زیرمسئله‌های بهینه‌سازی می‌شود. در نهایت پس از حل زیرمسئله‌های بهینه سازی، توان راکتیو تزریقی که هر کدام از جبران‌کننده‌ها برای داشتن حداقل تلفات در سیستم بایستی به شبکه تزریق کنند بدست می‌آید. لازم به ذکر است این مقادیر توسط لینک‌های

ارتباطی موجود در میکروشبکه‌ی هوشمند به جبران‌کننده‌ها اعلام می‌گردند. در ادامه یک میکروشبکه‌ی نمونه که بخشی از یک شبکه‌ی توزیع سه‌فاز و نامتعادل می‌باشد جهت نشان دادن صحت الگوریتم مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج شبیه‌سازی که با استفاده از نرم افزار Matlab ارائه شده است نشان‌دهنده‌ی کاهش تلفات سیستم و بهبود پروفیل ولتاژ می باشند.

کلمات کلیدی: جبران‌سازی توان راکتیو، میکروشبکه، پخش‌بار نامتعادل، مسئله‌ی بهینه‌سازی، کلاستربندی

فهرست مطالب

فصل اول – مقدمه

۱-۱- *مقدمه‌ای بر توان راکتیو و جبران‌سازی آن*.....۱

۱-۱-۱- *اصول جبران‌سازی توان راکتیو*.....۲

۱-۱-۱-۱- *جبران‌سازی موازی*.....۲

۱-۱-۱-۲- *جبران‌سازی سری*.....٤

۱-۱-۲- *ادوات جبران‌سازی توان راکتیو*.....۵

۱-۱-۲-۱- *جبران‌کننده‌های توان راکتیو با کموتاسیون خودی*.....٦

۱-۲- *میکروشبکه‌های هوشمند و سیستمهای اندازه‌گیری آن*.....۱۰

۱-۲-۱- *میکروشبکه‌های هوشمند*.....۱۰

۱-۲-۲- *سیستم‌های اندازه‌گیری در شبکه‌های هوشمند*.....۱۳

۱-۲-۲-۱- *معماری سیستم‌های اندازه‌گیری هوشمند*.....۱۵

۱-۳- *مروری بر برخی مطالعات انجام شده در زمینه‌ی جبران‌سازی توان راکتیو*.....۱٦

۱-٤- *اهداف پایان‌نامه*.....۱۹

۱-۵- *سازماندهی پایان‌نامه*.....۲۰

فصل دوم – ***مدل‌سازی ومعادلات حاکم برمیکروشبکه***

۲-۱- *مدل میکروشبکه*.....۲۱

۲-۲- *معادلات حاکم برمیکروشبکه*.....۲۳

۲-۳- *مدل تقریبی*.....۲۵

۲-۳-۱- *گرادیان مختلط*.....۲٦

۲-۳-۲- *حل تقریبی جریان*.....۲۸

فصل سوم - فرمول‌بندی مسئله

۳-۱- مقدمه ۳۲

۳-۲- تابع هزینه ۳۲

۳-۳- تخمین گرادیان تابع هزینه ۳۵

فصل چهارم - پخش بار شبکه‌های توزیع نامتعادل

٤-۱- مقدمه ۳۸

٤-۲- پخش‌بار یک شبکه‌ی سه فاز نامتعادل چهارسیمه به روش رفت و برگشتی ٤۰

٤-۳- الگوریتم پخش‌بار ٤۱

٤-٤- همگرایی الگوریتم ٤۳

فصل پنجم –الگوریتم حل مسئله

۵-۱- مقدمه ٤۵

۵-۲- زیرمسئله‌های بهینه‌سازی ٤٦

۵-۳- حل زیرمسئله‌های بهینه‌سازی ٤۷

۵-٤- فاصله‌ی زمانی بین تکرارهای الگوریتم ۵۰

۵-٤-۱- مدل دینامیکی شبکه ۵۱

۵-٤-۲- مدل دینامیکی تقریبی ۵۳

۵-٤-۳- آنالیز مقادیر ویژه ۵۵

۵-۵- آنالیز الگوریتم ۵٦

۵-۵-۱- ماتریس $\boldsymbol{\Omega i}$ و خصوصیات آن ۵۷

۵-۵-۲- همگرایی الگوریتم ۵۸

۵-۵-۲-۱- مسئله‌ی بهینه‌سازی معادل ۵۹

۵-۵-۲-۲- شرط لازم برای همگرایی الگوریتم ٦۰

۵-٦- نحوه‌ی کلاستربندی جبران‌کننده‌ها ٦۳

فصل ششم – بررسی نتایج شبیه‌سازی

٦-١- مقدمه ٦٤

٦-٢- شبکه‌ی مورد مطالعه ٦٥

٦-٣- بررسی نتایج شبیه‌سازی ٦٨

فصل هفتم–نتیجه‌گیری و پیشنهادات

٧-١- نتیجه‌گیری ٧٢

٧-٢- پیشنهادات ٧٣

مراجع ٧٤

فهرست شکل‌ها

شکل (۱-۱)- جبران‌سازی موازی توان راکتیو ۳

شکل (۱-۲)- جبران‌سازی سری توان راکتیو ٤

شکل (۱-۳)- انواع مختلف SVC ٥

شکل (۱-٤)- شبکه‌ی قدرت با جبران‌ساز سری و بدون آن ٦

شکل (۱-٥)- جبران‌سازی توان راکتیو توسط (الف) مبدل منبع ولتاژ (ب) مبدل منبع جریان ۷

شکل(۱-٦)- شکل موج‌های شبیه‌سازی شده‌ی ولتاژ و جریان جبران‌کننده‌ی VAr با کموتاسیون خودی الف) توپولوژی جبران‌کننده ب) جریان و ولتاژ شبیه‌سازی برای جبران‌سازی پیش‌فاز ج) جریان و ولتاژ شبیه‌سازی برای جبران‌سازی پس‌فاز ۷

شکل (۱-۷)- شکل موج ولتاژ خروجی جبران‌کننده برای اندیس‌های مدلاسیون مختلف ۸

شکل (۱-۸)- یک میکروشبکه به همراه تولیدات پراکنده ۱۲

شکل (۱-۹)- بخش‌های مختلف سیستم اندازه‌گیری هوشمند ۱۳

شکل (۲-۱)- گراف نشان دهنده‌ی مدل میکروشبکه ۲۱

شکل (٤-۱)- شبکه توزیع سه فاز چهار سیمه ٤۰

شکل(٤-۲)- مدل شبکه سه فاز چهار سیمه ٤۱

شکل (٥-۱)- نحوه‌ی انتخاب هایپرگراف ٦۳

شکل (٥-۲)- نحوه‌ی کلاستربندی جبران کننده‌ها ٦۳

شکل(٦-۱)- شبکه‌ی مورد مطالعه ٦٥

شکل (٦-۲)- پروفیل ولتاژ میکروشبکه بدون جبران‌کننده ٦۸

شکل (٦-۳)- تغییرات توان راکتیو تزریقی مربوط به فاز a ٦۹

شکل (٦-٤)- تغییرات توان راکتیو تزریقی مربوط به فاز b ٦۹

شکل (٦-٥)- تغییرات توان راکتیو تزریقی مربوط به فاز c ۷۰

شکل (٦-٦)- پروفیل ولتاژ میکروشبکه پس از جبران‌سازی بهینه ۷۰

شکل (٦-۷)- نمودار تغییرات تلفات سیستم ۷۱

فهرست جدول‌ها

جدول (۱-۱)- مقایسه‌ی بین انواع جبران‌کننده‌های توان راکتیو..... ۸
جدول (٦-۱)- توان اکتیو و راکتیو مصرفی توسط بارهای موجود در میکروشبکه..... ٦٥
جدول (٦-۲)- امپدانس خطوط میکروشبکه‌ی مورد مطالعه..... ٦٦

لیست نمادها و علائم اختصاری

FACTS	lexible AC Transmission Systems
STATCOM	STATic COMpensators
UPFC	Unified Power Flow Controllers
SVC	Static Var Copmensator
TCSC	Thyristor Control Series Capacitor
PST	Phase Shift Transformer
SSR	Sub Synchronous Resonance
VSC	Votage Source Convertor
CSC	Current Source Convertor
PWM	Pulse Wide Modulation
THD	Total harmonic distortion
ISVM	Indirect Space Vector Modulation
AMI	Advanced Metering Infrastructure
LAN	Local Area Network
WAN	Wide Area Network
NMS	Network Management System
Ker	Kernel
Y^T	Transpose of Y
$\overline{Y}$	Complex Conjugate of Matrix Y
1_w	is a vector whose components are all one and, for the sake of clarity, we denote this vector as 1
PCC	Point of Common Coupling
R	Real Numbers
C	Complex Numbers
R	m*n Matrix

فصل اول

مقدمه

۱-۱-مقدمه‌ای بر توان راکتیو و جبران‌سازی آن

هرگاه یک دستگاه در شبکه قدرت جریانی غیرهمفاز با ولتاژ تزریق کند (یا توسط آن تغذیه شود) در این صورت تزریق (تحویل) توان راکتیو در شبکه بوجود می‌آید.

جهت بیان رابطه فیزوری بین ولتاژ و جریان از تعریف توان مختلط استفاده می‌کنیم:

$$s(v) = u(v).\bar{\imath}(v) = p(v) + jq(v) \qquad (۱-۱)$$

که در آن $u(v)$ ولتاژ گره، $i(v)$ جریان تزریق شده به گره، $s(v)$ توان مختلط تزریقی به گره، $q(v)$ و $p(v)$ توان راکتیو و اکتیو تزریقی به گره می باشند. توان راکتیو در یک سیستم تکفاز برابر مولفه ac توان لحظه‌ای می‌باشد که با فرکانس دو برابر شبکه تولید و بین بارها (سلفی یا خازنی) و منبع رد و بدل می‌شود. عبور توان راکتیو از خطوط و کابل‌ها باعث تلفات

توان در آنها و همچنین باعث کاهش ظرفیت خطوط می‌شود، لازم به ذکر است تولید توان راکیتو هزینه سوخت ندارد.

جبران‌سازی و مدیریت توان راکتیو جهت بهبود عملکرد سیستم‌های ac انجام می‌گیرد. جبران‌سازی توان راکتیو دغدغه‌ای هم برای شبکه و هم برای مصرف‌کننده می‌باشد (پرداخت جریمه مصرف بالای راکتیو توسط مصرف کننده) و بسیاری از مسایل مربوط به کیفیت توان را می‌توان با کنترل مناسب توان راکتیو حل کرد.

جبران‌سازی با هدف افزایش ضریب توان سیستم، تنظیم ولتاژ سیستم و حذف مولفه‌های هارمونیکی جریان که توسط بارهای صنعتی غیرخطی تولید شده‌اند انجام می‌گیرد. جبران‌سازی توان راکتیو در خطوط انتقال همچنین باعث افزایش پایداری سیستم با افزایش حداکثر توان اکتیو قابل انتقال توسط خط می‌شود در ضمن جهت کنترل اضافه ولتاژهای دائم و گذرا مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱-۱-۱-اصول جبران سازی توان راکتیو

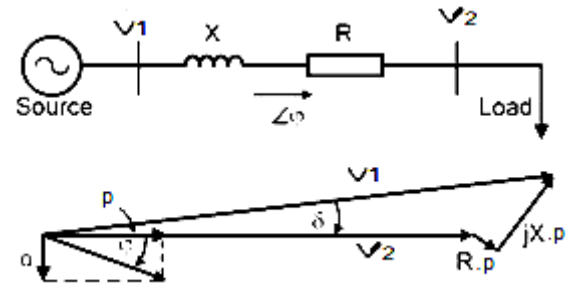
۱-۱-۱-۱-جبران‌سازی موازی

اگر توان راکتیو بار در نزدیکی آن تامین شود، جریان خط می‌تواند کاهش یا مینیمم یابد که باعث کاهش تلفات خط و بهبود ولتاژ سیستم در ترمینال بار می‌گردد.

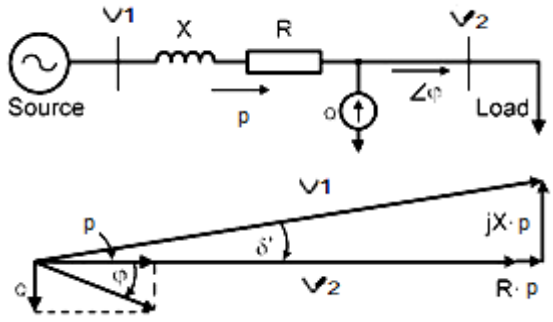
جبران‌سازی موازی از سه روش قابل انجام است:

- ازطریق خازن
- از طریق منبع ولتاژ
- از طریق منبع جریان

شکل (۱-۱) جبران‌سازی موازی توان راکتیو توسط منبع جریان را نشان می‌دهد.



الف



ب

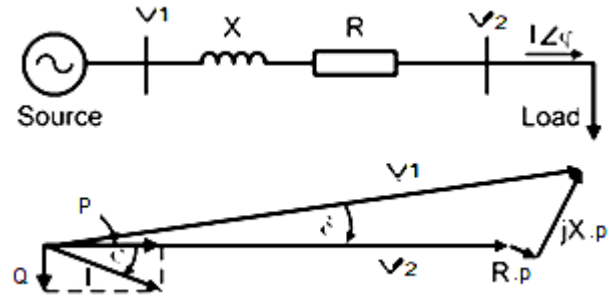
شکل (۱-۱)- جبران‌سازی موازی توان راکتیو

الف) سیستم بدون جبران‌سازی ب) سیستم جبران‌سازی شده با منبع جریان

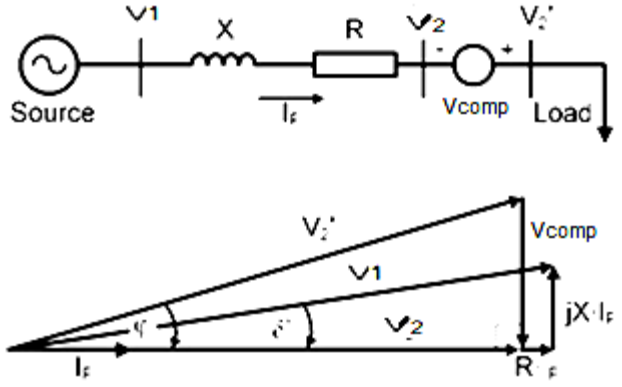
در شکل b، جبران‌کننده مولفه‌ی راکتیو جریان (IQ) را جبران می‌کند.

۱-۱-۱-۲- جبران سازی سری

سیستم‌های جبران‌سازی سری معمول از خازن جهت کاهش راکتانس معادل خط در فرکانس نامی استفاده می‌کنند. جبران‌سازی سری نیز از طریق سه روش ذکر شده در مورد جبران‌سازی موازی قابل انجام است. شکل (۱-۲) جبران‌سازی سری توان راکتیو را توسط منبع ولتاژ نشان می‌دهد.



الف



ب

شکل (۱-۲)- جبران‌سازی سری توان راکتیو

الف) سیستم بدون جبران‌کننده ب) سیستم جبران‌سازی شده با منبع ولتاژ

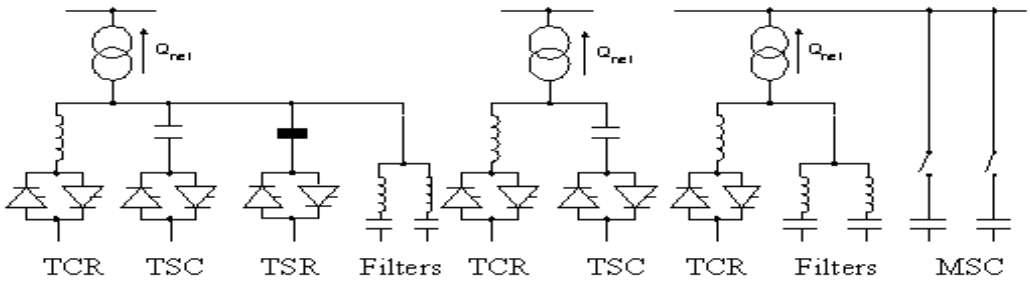
درشکل b جبران‌کننده‌ی منبع ولتاژ بین خط و بار قرارگرفته و جهت تغییر زاویه ولتاژ V'2 که در حال‌حاضر ولتاژ بار می‌باشد مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین با تنظیم مناسب اندازه Vcomp ضریب توان یک می‌تواند بدست آید.

۱-۱-۲-ادوات جبران‌سازی توان راکتیو

برخی از ادوات مرسوم جهت جبران‌سازی توان راکتیو در زیر آمده است:

- خازن های ثابت و سوئیچ شونده
- کندانسورهای سنکرون
- جبران‌کننده‌های توان راکتیو با کموتاسیون خودی
- ادوات FACTS
  - ❖ SVC: جبران‌ساز VAr استاتیکی
  - ❖ STATCOM: جبران‌ساز استاتیکی
  - ❖ TCSC: خازن سری با کنترل تریستوری
  - ❖ PST: ترانسفورماتور شیفت‌دهنده فاز (تنظیم‌کننده زاویه فاز)
  - ❖ UPFC: کنترل‌کننده یکپارچه پخش توان

شکل (۱-۳) انواع مختلف SVC را نشان می‌دهد.



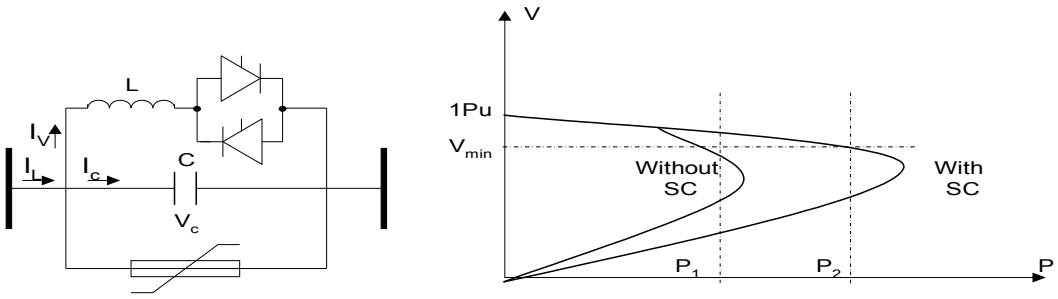
شکل (۱-۳)- انواع مختلف SVC

جبران‌سازی خطوط انتقال توسط خازن‌های سری با اهداف زیر صورت می‌گیرد:

- کاهش زاویه و اندازه‌ی امپدانس خط انتقال
- افزایش ظرفیت انتقال و افزایش حد پایداری گذرا

- میراکردن رزونانس زیرسنکرون (SSR) که امکان رویداد این پدیده در خطوط بلند جبران‌سازی شده با خازنهای سری وجود دارد
- کنترل توان خطوط

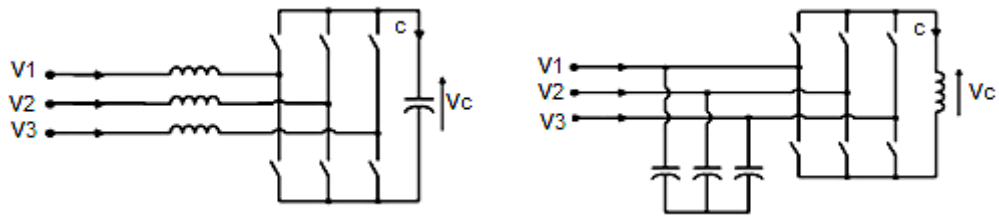
شکل (۱-٤) شبکه‌ی قدرت را با جبران‌ساز سری و بدون آن نشان می‌دهد.



شکل (۱-٤)- شبکه‌ی قدرت با جبران‌ساز سری و بدون آن

۱-۱-۲-۱- جبران‌کننده‌های توان راکتیو با کموتاسیون خودی

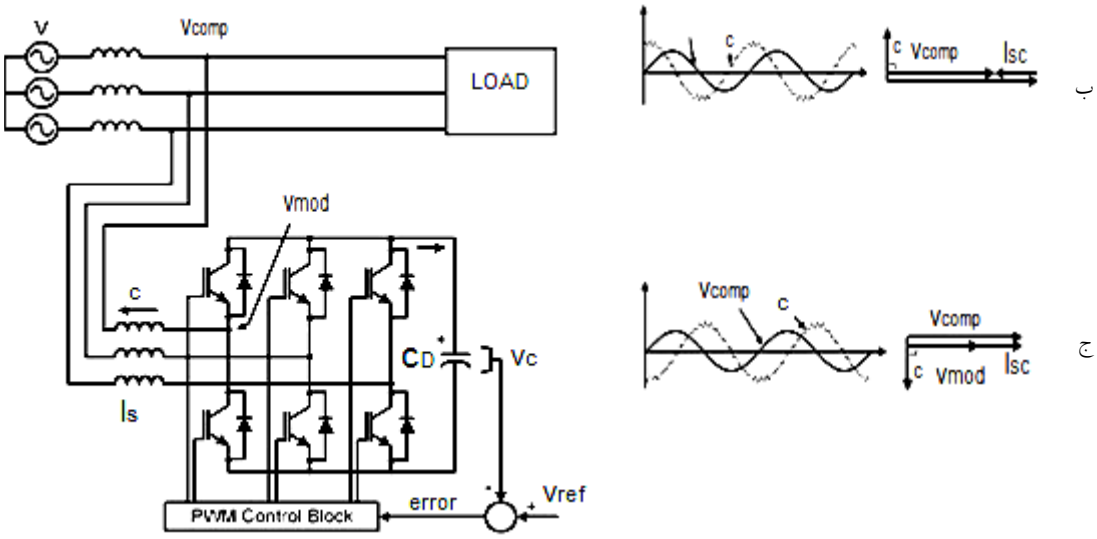
در این روش[۱] و [۲]، جبران‌سازی بدون نیاز به بانک‌های بزرگ سلفی و خازنی و توسط مبدل منبع ولتاژ VSC یا توسط مبدل منبع جریان CSC انجام می‌گیرد که در شکل (۱-۵) نشان داده شده است. با توجه به عدم استفاده از ادوات پسیو و استفاده از ادوات الکترونیک قدرت حجم جبران‌کننده‌ها کمتر و قیمت آنها نیز ارزانتر می‌باشند.



ب الف

شکل (۱-۵)- جبران‌سازی توان راکتیو توسط (الف) مبدل منبع ولتاژ (ب) مبدل منبع جریان

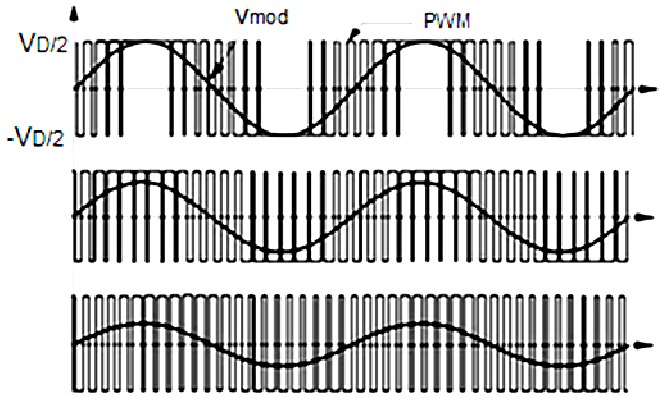
بهبود تنظیم ولتاژ، اصلاح ضریب توان و اصلاح نامتعادلی بار از مزایای استفاده از این نوع جبران‌کننده‌ها می‌باشند. در شکل (۱-٦) یک جبران‌کننده‌ی خودکموتاسیون موازی نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد اگر Vmod>Vcomp باشد جبران‌کننده در حالت پیش فاز می‌باشد و اگر Vmod<Vcomp باشد جبران‌کننده در حالت پس فاز می‌باشد. تغییر اندازه Vmod با تغییر اندیس مدلاسیون و یا تغییر ولتاژ Vd مبدل امکان پذیر است.



الف ب ج

شکل (۱-٦)- شکل موج‌های شبیه‌سازی شده‌ی ولتاژ و جریان جبران‌کننده‌ی VAr با کموتاسیون خودی الف) توپولوژی جبران‌کننده ب) جریان و ولتاژ شبیه‌سازی برای جبران‌سازی پیش‌فاز ج) جریان و ولتاژ شبیه‌سازی برای جبران‌سازی پس‌فاز

در شکل (۱-۷) شکل موج ولتاژ خروجی جبران‌کننده برای اندیس‌های مدلاسیون مختلف نشان داده شده است.



شکل (۱-۷)- شکل موج ولتاژ خروجی جبران‌کننده برای اندیس‌های مدلاسیون مختلف

مقایسه بین انواع جبران‌کننده‌های توان راکتیو

- در خصوص جبران‌کننده‌های با کموتاسیون خودی به دلیل عدم استفاده از بانک‌های خازنی و سلفی در مقایسه با جبران‌کننده‌های استاتیکی از پدیده رزونانس در برخی شرایط عملکرد بحرانی جلوگیری می‌شود.
- زمان پاسخگویی در مورد این جبران‌کننده‌ها نسبت به جبران‌کننده‌های استاتیکی بیشتر بوده و به فرکانس سوئیچینگ بستگی دارد.
- این جبران‌کننده‌ها به همراه کنترل مناسب مانند فیلترهای هارمونیکی فعال عمل می کنند.

در جدول (۱-۱) مقایسه‌ی بین انواع جبران‌کننده‌های توان راکتیو ارائه شده است.

جدول (۱-۱)- مقایسه‌ی بین انواع جبران‌کننده‌های توان راکتیو

Synchronous Condenser	Static Compensator		Self-commutated Compensator
	TCR (with shunt	TSC (with TCR if	

		capacitors if necessary	necessary	
Accuracy of Compensation	Good	Very Good	Good, very good with TCR	Excellent
Control Flexibility	Good	Very Good	Good, very good with TCR	Excellent
Reactive Power Capability	Leading/Lagging	Lagging/Leading indirect	Leading/Lagging Indirect	Leading/Lagging
Control	Continuous	Continuous	Discontinuous (cont. with TCR)	Continuous
Response Time	Slow	Fast, 0.5 to 2 cycles	Fast, 0.5 to 2 cycles	Very fast but depends on the control system and switching frequency
Harmonics	Very Good	Very high (large size filters are needed)	Good, filters are necessary with TCR	Good, but depends on switching pattern
Losses	Moderate	Good, but increase in lagging mode	Good, but increase in leading mode	Very good, but increase with switching frequency
Phase Balancing Ability	Limited	Good	Limited	Very good with 1-f units, limited with 3-f units
Cost	High	Moderate	Moderate	Low to moderate

۱-۲-میکروشبکه‌های هوشمند[۱] و سیستم‌های اندازه‌گیری آن[۲]

۱-۲-۱- میکروشبکه‌های هوشمند

۱- Smart Grids
۲ –Advanced Metering Infrastructure (AMI)