

## فصل پنجم

### کنترل توان اکتیو و راکتیو

#### ۱-۵ مقدمه

در یک سیستم قدرت ایده‌آل، فرکانس ثابت است و ولتاژ نقاط مختلف آن در محدوده مناسبی کنترل می‌گردد. در مباحث قبلی، وابستگی توان راکتیو به ولتاژ را در یک سیستم مشاهده کردیم. بنابر این می‌توان ولتاژ و توان راکتیو را همزمان و در یک کانال کنترل نمود. همچنین دیدیم که تغییرات توان اکتیو به زاویه قدرت ( $\delta$ ) بستگی داشته و تقریباً مستقل از ولتاژ است. در این فصل خواهیم دید که زاویه  $\delta$  بر اثر تغییر سرعت و فرکانس ماشین تغییر می‌نماید و لذا قدرت اکتیو، زاویه قدرت و فرکانس در یک کانال قابل کنترل می‌باشند. برای آشنائی بیشتر با این دو کانال کنترل، هر یک را بطور مشروح معرفی می‌کنیم.

#### ۱-۱-۵ معرفی کانال کنترل توان راکتیو و ولتاژ

توان راکتیو یکی از مهمترین عواملی است که در طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت AC منظور می‌گردد. علاوه بر بارها، اغلب عناصر یک شبکه مصرف‌کننده توان راکتیو هستند. بنابر این باید توان راکتیو در بعضی نقاط سیستم تولید و به محل‌های مورد نیاز منتقل شود.

در خطوط انتقال دیدیم که قدرت راکتیو انتقالی یک خط، به اختلاف ولتاژ ابتدا و انتهای خط بستگی دارد. همچنین با افزایش دامنه ولتاژ شین ابتدائی خط، قدرت راکتیو جدا شده از این شین افزایش می‌یابد. در فصل (۲) مشاهده کردیم که قدرت راکتیو تولید شده توسط ژنراتور، به تحریک آن بستگی داشته و با تغییر نیروی محرکه ژنراتور می‌توان میزان قدرت راکتیو تولیدی و یا مصرفی آنرا تنظیم نمود. در یک سیستم بهم پیوسته نیز با انجام پخش بار در وضعیت‌های مختلف می‌توان دید که تزریق قدرت راکتیو به یک شین، ولتاژ همه شین‌ها را بالا می‌برد و بیش

از همه روی ولتاژ همان شین تأثیر می‌گذارد، لیکن تأثیر زیادی بر زاویه ولتاژ شین‌ها و فرکانس سیستم ندارد. بنابر این قدرت راکتیو و ولتاژ در یک کانال کنترل می‌شوند که آنرا کانال کنترل QV، قدرت راکتیو - ولتاژ، یا مگاوار - ولتاژ می‌نامیم.

در عمل تجهیزات یک سیستم قدرت برای ولتاژ مشخصی، ولتاژ نامی، طراحی می‌شوند. اگر ولتاژ از مقدار نامی خود منحرف شود ممکن است باعث صدمه رساندن به تجهیزات سیستم و یا کاهش عمر آنها گردد. برای مثال گشتاور یک موتور القائی با توان دوم ولتاژ ترمینالهای آن متناسب است و یا شار نوری یک لامپ مستقیماً با ولتاژ آن تغییر می‌نماید. بنابر این تثبیت ولتاژ نقاط یک سیستم از لحاظ اقتصادی کاملاً ضروری است. بدیهی است که کنترل و تثبیت ولتاژ تمام نقاط سیستم از لحاظ اقتصادی عملی نمی‌باشد. از طرف دیگر کنترل ولتاژ در حد کنترل فرکانس ضرورت نداشته و در بسیاری از سیستم‌ها خطای ولتاژ در محدوده  $\pm 0.5\%$  تنظیم می‌شود.

توان راکتیو مصرفی بارها در ساعات مختلف در حال تغییر است، لذا ولتاژ و توان راکتیو باید دائماً کنترل شوند. در ساعات پربار، بارها قدرت راکتیو بیشتری مصرف می‌کنند و نیاز به تولید قدرت راکتیو زیادی در شبکه می‌باشد. اگر قدرت راکتیو مورد نیاز تأمین نشود اجباراً ولتاژ نقاط مختلف شبکه کاهش یافته و ممکن است از محدوده مجاز خارج شود. نیروگاهها دارای سیستم کنترل ولتاژ هستند که کاهش ولتاژ را حس کرده و فرمان کنترل لازم را برای بالا بردن تحریک ژنراتور و در نتیجه افزایش ولتاژ ژنراتور تا سطح ولتاژ نامی صادر می‌کنند. با بالا بردن تحریک (حالت کار فوق تحریک) قدرت راکتیو توسط ژنراتورها تولید می‌شود. لیکن قدرت راکتیو تولیدی ژنراتورها بخاطر مسائل حرارتی سیم‌پیچ‌ها محدود بوده و ژنراتورها به تنهایی نمی‌توانند در ساعات پربار تمام قدرت راکتیو مورد نیاز سیستم را تأمین کنند. بنابراین در این ساعات به وسائلی نیاز است که بتوانند قدرت راکتیو به شبکه تزریق نمایند تا سطوح ولتاژ در محدوده مجاز قرار گیرند.

در ساعات کم بار، بارها و عناصر شبکه، قدرت راکتیو کمی مصرف می‌نمایند و کاپاسیتانس خطوط انتقال باعث اضافه شدن قدرت راکتیو تولیدی در شبکه می‌گردد. در این حالت ژنراتورها بصورت زیر تحریک بکار افتاده و مقداری از قدرت راکتیو اضافی سیستم را مصرف می‌نمایند. لیکن بخاطر ملاحظات پایداری، قدرت راکتیو مصرفی ژنراتورها نیز محدود بوده و ژنراتورها نمی‌توانند به تنهایی مسأله قدرت راکتیو اضافی و افزایش ولتاژ ناشی از آنرا حل کنند. بنابر این به وسائلی که بتوانند در این ساعات قدرت راکتیو اضافی سیستم را مصرف نمایند نیاز می‌باشد.

وسائلی را که برای کنترل توان راکتیو ولتاژ بکار می‌روند "جبران کننده" (۱) می‌نامیم. همانطوریکه ملاحظه می‌شود توازن قدرت راکتیو در سیستم، تضمینی بر ثابت بودن ولتاژ، و کنترل قدرت راکتیو بمنزله کنترل ولتاژ می‌باشد.

## ۲-۱-۵ معرفی کانال کنترل توان اکتیو و فرکانس

قدرت اکتیو هنگام نیاز باید تولید شود و چون مصرف بارها در ساعات مختلف شبانه روز تغییر می‌نماید، لذا قدرت تولیدی ژنراتورها نیز باید کنترل گردد. قدرت خروجی یک ژنراتور با تغییر دادن قدرت مکانیکی ورودی آن کنترل می‌شود. برای این کار با باز کردن یا بستن شیر بخار (۲) و یا دریچه آب (۳)، جریان بخار و یا آب روی توربین تنظیم شده و باعث کنترل قدرت مکانیکی و در نتیجه قدرت اکتیو خروجی ژنراتور می‌گردد. اگر قدرت مصرفی بار افزایش یابد، باید شیر بخار و یا دریچه آب بیشتر باز شود که بهمان میزان قدرت تولیدی ژنراتور افزایش داده شود، و چنانچه قدرت مصرفی بار کاهش یابد، باید شیر بخار و دریچه آب تا حدی بسته شود که بهمان نسبت باعث کاهش قدرت تولیدی ژنراتور شده و در نتیجه توازن قدرت اکتیو برقرار گردد.

عدم توازن قدرت، از تأثیر آن بر سرعت و یا فرکانس ژنراتور حس می‌گردد. در صورت کاهش بار و اضافه بودن تولید، ژنراتور تمایل به افزایش سرعت و فرکانس خود دارد، و در صورت افزایش بار و کمبود تولید، سرعت و فرکانس ژنراتور رو به کاهش می‌رود. انحراف فرکانس از مقدار نامی آن بعنوان سیگنالی جهت تحریک سیستم کنترل اتوماتیک انتخاب می‌شود. توازن قدرت اکتیو بمنزله ثابت بودن فرکانس سیستم است که این موضوع به نوبه خود دارای اهمیت فراوانی می‌باشد.

اگر فرکانس ژنراتور را در شرایط ماندگار با  $f^\circ$  و ولتاژ آنرا با  $V^\circ = |V^\circ| \angle \delta^\circ$  نشان دهیم، معادله ولتاژ را می‌توانیم بصورت زیر بنویسیم:

$$V = \sqrt{V} |V^\circ| \sin(\omega t + \delta^\circ) \quad (5-1)$$

که در آن  $\omega = 2\pi f^\circ$  فرکانس زاویه‌ای ماشین در حالت ماندگار است. بر اثر یک تغییر کوچک و آرام در سیستم، تغییرات دینامیکی در فرکانس و ولتاژ بوجود می‌آید و مدت زمانی طول می‌کشد تا سیستم به حالت ماندگار جدید برسد. در این فاصله زمانی، زاویه قدرت و ولتاژ متغیر بوده و از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$\delta = \delta^\circ + \Delta\delta$$

$$|V| = |V^\circ| + \Delta |V| \quad (5-2)$$

در اینجا  $\Delta\delta$  و  $\Delta|V|$  بترتیب خطای زاویه قدرت و خطای ولتاژ می‌باشند که در حالت دینامیک سیستم، مقادیر آنها متغیر است. بنابر این معادله ولتاژ در حالت دینامیک را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$v = \sqrt{2} (|V^\circ| + \Delta|V|) \sin(\omega^\circ + \delta^\circ + \Delta\delta) \quad (5-3)$$

و از اینجا فرکانس زاویه‌ای  $\omega$  در شرایط دینامیک برابر است با:

$$\omega = \frac{d}{dt} (\omega^\circ + \delta^\circ + \Delta\delta) = \omega^\circ + \frac{d}{dt} \Delta\delta$$

و یا:

$$\Delta\omega = \omega - \omega^\circ = \frac{d}{dt} \Delta\delta \quad (5-4)$$

اگر فرکانس در حالت دینامیک را با  $f$  نشان دهیم، داریم:

$$\omega = 2\pi f$$

$$\Delta\omega = 2\pi\Delta f \quad (5-5)$$

با جایگزینی  $\Delta\omega$  در رابطه (5-4) خواهیم داشت:

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \Delta\delta \quad (5-6)$$

این رابطه نحوه تغییر فرکانس  $\Delta f$  برحسب تغییر زاویه قدرت  $\Delta\delta$  و بالعکس را نشان می‌دهد. قبلاً دیدیم که تغییرات قدرت اکتیو به زاویه قدرت بستگی دارد. بنابر این قدرت اکتیو، زاویه

قدرت و فرکانس در یک کانال کنترل می‌شوند که آنرا کانال کنترل Pf، قدرت - فرکانس<sup>(۱)</sup>، و یا مگاوات - فرکانس می‌نامیم. سیستم کنترل مربوطه نیز به سیستم کنترل اتوماتیک بار - فرکانس<sup>(۲)</sup>، LFC، معروف است.

حلقه کنترل LFC فقط به تغییرات کم دامنه و آرام بار و فرکانس پاسخ می‌دهد و در شرایط اضطراری و عدم توازن قدرت ناشی از آن قادر به کنترل نمی‌باشد. کنترل سیستم در شرایط اضطراری و تغییرات ناگهانی با مطالعه پایداری گذرا و حفاظت سیستم‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کنترل توان راکتیو جزو مباحث درس بررسی سیستم‌های قدرت ۲ نمی‌باشد، لیکن برای آشنائی دانشجویان با این مبحث پراهمیت، در این فصل بطور خلاصه مطالبی را در مورد آن بیان خواهیم کرد و بقیه فصل را به مطالعه کنترل توان اکتیو و فرکانس اختصاص خواهیم داد.

## ۲-۵ کنترل توان راکتیو و ولتاژ

بطور کلی کنترل توان راکتیو و ولتاژ از سه روش اصلی زیر انجام می‌شود:

- ۱- با تزریق توان راکتیو به سیستم توسط جبران‌کننده‌هایی که بصورت موازی متصل می‌شوند (مانند خازن - راکتور - کندانسور سنکرون و جبران‌کننده‌های استاتیک).
- ۲- با جابجا کردن قدرت راکتیو در سیستم توسط ترانسفورماتورهای متغیر.
- ۳- از طریق کم کردن راکتانس القائی خطوط انتقال با نصب خازن سری.

قبل از بررسی روش‌های فوق‌الذکر، سیستم کنترل ولتاژ ژنراتورها را مطالعه می‌کنیم، گرچه در دسته‌بندی سه‌گانه فوق، کنترل ولتاژ و قدرت راکتیو ژنراتورها می‌تواند در دسته اول قرار گیرد.

### ۱-۲-۵ سیستم کنترل ولتاژ ژنراتورها

جریان تحریک ژنراتورها معمولاً بوسیله یک ژنراتور DC (اکسایتر)<sup>(۳)</sup> که توسط یک موتور و یا محور توربین - ژنراتور می‌گردد تأمین می‌شود. یکسوکننده‌ها<sup>(۴)</sup> و واحدهای تریستوری<sup>(۵)</sup> که ولتاژهای AC را به DC تبدیل می‌کنند به طرق مختلف در سیستم کنترل ولتاژ

1- Power- Frequency

2- Load - Frequency Control

3- Exciter

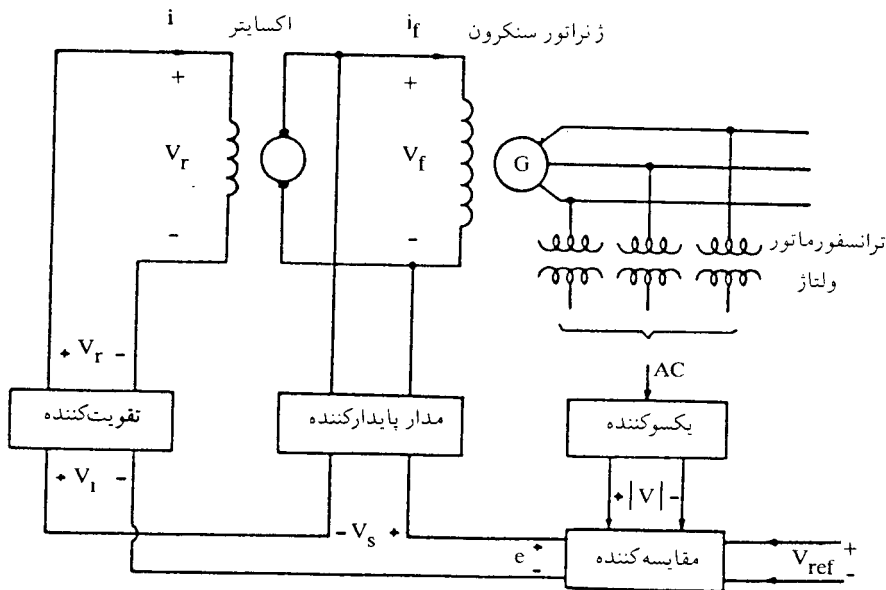
4- Rectifiers

5- Thyristor Units

بکار می‌روند. همچنین مقایسه‌کننده‌ها<sup>(۱)</sup>، حلقه‌های فیدبک و تقویت‌کننده‌ها<sup>(۲)</sup> نیز با انواع روش‌های موجود در این سیستم بکار گرفته می‌شوند. سیستم کامل کنترل ولتاژ به "رگولاتور اتوماتیک ولتاژ"<sup>(۳)</sup> AVR، موسوم است.

یکی از انواع سیستم‌های AVR در شکل (۱-۵) نشان داده شده است. ولتاژ اندازه‌گیری شده و یکسو شده ژنراتور  $|V|$  با ولتاژ مرجع<sup>(۴)</sup> مقایسه می‌شود و خطای حاصله پس از تقویت به میدان تحریک یک نوع ژنراتور DC با ضریب تقویت بالا موسوم به آمپلیدین<sup>(۵)</sup> اعمال می‌گردد. آمپلیدین (اکسایتر) میدان اصلی ژنراتور را تحریک و کنترل می‌کند.

چنانچه ولتاژ ژنراتور نسبت به مقدار نامی آن کاهش یابد، خطای ولتاژ  $e = V_{ref} - |V|$  مثبت بوده و این خطا پس از تقویت، باعث افزایش جریان تحریک آمپلیدین و در نتیجه افزایش تحریک ژنراتور شده و ولتاژ ژنراتور را افزایش می‌دهد و این کار تا رسیدن ولتاژ ژنراتور به مقدار نامی ادامه می‌یابد.



شکل ۱-۵: شمای یک نوع سیستم AVR

1- Comparators

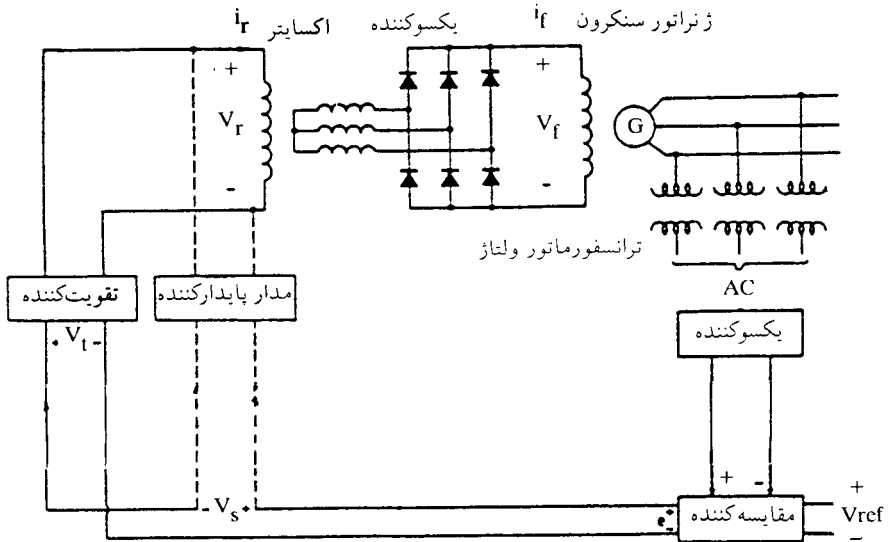
2- Amplifiers

3- Automatic Voltage Regulator

4- Reference Voltage

5- Amplidyne

در مدار AVR ثابت زمانی های تقویت کننده و سیستم اکسایتر نسبتاً زیاد بوده و بترتیب حدود ۰/۱ ثانیه و ۱ ثانیه می باشند. ثابت زمانی مدار تحریک ژنراتور نیز حدود چند ثانیه است. این سه ثابت زمانی، بخصوص ثابت زمانی مدار تحریک می توانند سیستم را ناپایدار کنند. برای پایدار کردن و کاهش ثابت زمانی کل سیستم معمولاً از مدار پایدار کننده<sup>(۱)</sup> استفاده می شود. مدارهای پایدار کننده دارای انواع مختلف هستند و طرح اغلب آنها طوری است که مانند یک مشتق گیر عمل کرده و باعث تسریع در پاسخ مدار و پایدار شدن سیستم می گردد. بطور کلی ثابت زمانی کل سیستم کنترل ولتاژ AVR در مقایسه با ثابت زمانی سیستم کنترل بار-فرکانس LFC بسیار کمتر بوده و بر اثر اختلالات کم دامنه، حلقه کنترل ولتاژ با سرعت خوبی پاسخ می دهد، در حالیکه پاسخ حلقه کنترل LFC چند ثانیه بطول می انجامد. سیستم های اکسایتر جدید معمولاً بدون جاروبک<sup>(۲)</sup> بوده و در آنها از عناصر ساکن (غیردوار) استفاده می شود. یکی از معمول ترین و مدرن ترین سیستم های کنترل ولتاژ AVR بدون جاروبک در شکل (۲-۵) نشان داده شده است.



شکل ۲-۵: سیستم کنترل ولتاژ AVR بدون جاروبک

در این سیستم، اکسایتر شامل یک ژنراتور ستکرون سه فاز است که سیم پیچ‌های سه فاز آن روی رتور، و میدان تحریک آن روی استاتور قرار دارند. ولتاژ AC ایجاد شده در سیم پیچ‌های رتور توسط دیودهایی که روی محور گردنده نصب شده‌اند یکسو شده، و ولتاژ DC بدست آمده میدان اصلی ژنراتور را تحریک می‌کند. به این ترتیب در طرح این سیستم، رینگ‌ها و جاروبکها حذف شده‌اند.

### ۳-۵ کنترل قدرت راکتیو و ولتاژ توسط ترانسفورماتورهای متغیر

ترانسفورماتورهای متغیر یکی از وسائل کنترل قدرت اکتیو و راکتیو در سیستم‌ها می‌باشند. اغلب ترانسفورماتورهای متغیر برای تنظیم دامنه ولتاژ بکار می‌روند. در این صورت قدرت راکتیوی به شبکه تزریق نمی‌شود و فقط قدرت‌های راکتیو موجود در خطوط و دیگر عناصر شبکه جابجا می‌شوند. محدوده کنترل دامنه ولتاژ با ترانسفورماتورهای متغیر حدود  $\pm 10\%$  است. بعضی ترانسفورماتورها بمنظور تغییر زاویه فاز مورد استفاده قرار گرفته و در نتیجه قدرت اکتیو را جابجا و کنترل می‌کنند. در بعضی ترانسفورماتورها نیز هر دو کمیت دامنه ولتاژ<sup>(۱)</sup> و زاویه فاز<sup>(۲)</sup> کنترل می‌شوند.

ترانسفورماتورهای متغیر که دارای تپ چنجر هستند با کنترل نسبت تبدیل در حالت بارداری، ولتاژ را بصورت پله‌ای کنترل می‌کنند. کنترل اتوماتیک تعداد حلقه‌های سیم پیچ‌ها در این ترانسفورماتورها توسط موتورهای الکتریکی و یا کنترل کننده‌های تریستوری انجام می‌شود. از این نوع ترانسفورماتورها برای ثابت نگه داشتن ولتاژ در بعضی شین‌های سیستم توزیع<sup>(۳)</sup> و فوق توزیع<sup>(۴)</sup> و سیستم شعاعی استفاده می‌گردد.

### ۴-۵ تزریق قدرت راکتیو به شبکه

در یک سیستم قدرت ایده آل، ولتاژ و فرکانس در شین‌های تولید کننده<sup>(۵)</sup> باید مقدار ثابتی بوده و سیستم بدون هارمونی و با ضریب قدرت یک باشد. معمولاً کنترل ولتاژ و ضریب قدرت در مصرف کننده‌ها و خطوط انتقال با تزریق قدرت راکتیو انجام می‌شود. تولید قدرت راکتیو توسط جبران کننده‌ها و تحویل آن به شبکه بمیزان مناسب، باعث بالا رفتن سطوح ولتاژ و اصلاح ضریب قدرت نقاط مورد نظر شبکه شده، و جذب قدرت راکتیو اضافی شبکه توسط جبران کننده‌ها بمیزان مناسب نیز باعث پائین آمدن سطوح ولتاژ خواهد شد.

1- Voltage Magnitude

2- Phase Angle

3- Distribution

4- Subtransmission

5- Generating Bus



معمولاً عبارت "اصلاح ضریب قدرت" (۱) هنگامی بکار می‌رود که مسأله جبران کنندگی (۲) توان راکتیو یک بار و یا گروهی از بارها مورد نظر باشد. بررسی کنترل توان راکتیو را با جبران کنندگی بار ادامه می‌دهیم.

### ۱-۴-۵ جبران کنندگی بار (۳)

مقصود از جبران کنندگی بار این است که کل توان راکتیو مورد نیاز بار و یا قسمت اعظم آن توسط جبران کننده در محل تأمین شود. هدف‌های جبران کنندگی و روشهایی که برای این کار مورد استفاده قرار می‌گیرد با جبران کنندگی کل سیستم قدرت متفاوت است. هدف‌های اساسی جبران کنندگی بار، اصلاح ضریب قدرت، بهبود ضریب تنظیم ولتاژ (۴) و در بعضی موارد متقارن کردن بار (۵) می‌باشد.

اغلب بارهای صنعتی دارای ضریب قدرت پس فاز بوده و لذا مصرف کننده قدرت راکتیو هستند. بنابر این جریان بار بیشتر از مقدار مورد نیاز برای مصرف قدرت اکتیو است. علاوه بر پرداخت اضافی برای این جریان، قطر کابل‌ها باید بیشتر انتخاب گردد و تلفات سیستم قدرت نیز بیشتر خواهد شد. از طرف دیگر اگر قدرت راکتیو مورد نیاز این بارها در محل تأمین شود، نیازی به تولید قدرت راکتیو توسط ژنراتورها و انتقال آنها نمی‌باشد.

وسائلی که بعنوان جبران کننده‌های بار استفاده می‌شوند علاوه بر اهداف ذکر شده باید هارمونی‌های اضافی در سیستم ایجاد نکنند، به تغییرات پاسخ سریع بدهند و خود مصرف کننده توان اکتیو نباشند. در بررسی اصلاح ضریب قدرت و تنظیم ولتاژ بار، سیستم قدرت را مطابق شکل (۳-۵) با مدار معادل تونن آن و جبران کننده را با یک امپدانس نشان می‌دهیم. جبران کننده توان راکتیو در یک شین بار برای یکی از دو منظور زیر طراحی و محاسبه می‌شود: الف) اصلاح ضریب قدرت: اگر ادmittانس بار را با  $Y_L = G_L + jB_L$  نشان دهیم و  $P_L$ ،  $Q_L$  و  $S_L$  بترتیب توانهای اکتیو، راکتیو و ظاهری بار باشند، ضریب قدرت بار قبل از نصب جبران کننده برابر است با:

$$\cos \Phi_L = \frac{G_L}{|Y_L|} = \frac{P_L}{S_L} \quad (5-7)$$

توان راکتیو مورد نیاز بار  $Q_L$  نیز برحسب  $P_L$  عبارتست از:

- 
- |                                      |                 |                      |
|--------------------------------------|-----------------|----------------------|
| 1- Power Factor Correction           | 2- Compensation | 3- Load Compensation |
| 4- Improvement of Voltage Regulation |                 | 5- Load Balancing    |

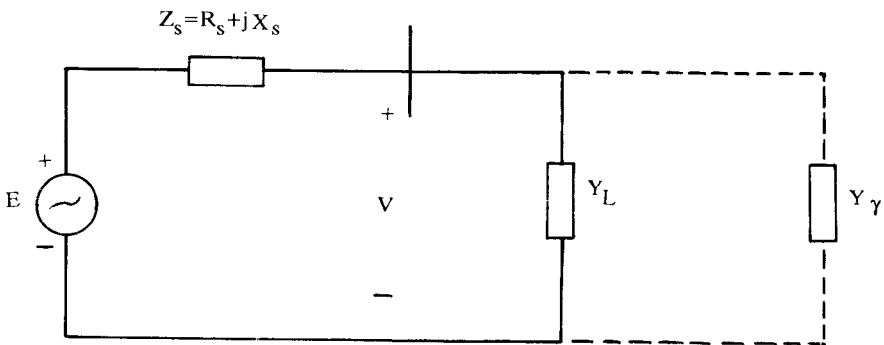
$$Q_L = S_L \sin\Phi_L = \frac{P_L}{\cos\Phi_L} \sin\Phi_L$$

بنابر این:

$$Q_L = P_L \tan\Phi_L$$

از آنجائیکه کل قدرت راکتیو مورد نیاز بار در این حالت توسط جبران کننده تأمین می‌شود، لذا قدرت راکتیو جبران کننده برابر است با:

$$Q_\gamma = P_L \tan\Phi_L$$



شکل ۳-۵: جبران کنندگی بار

و در اینصورت ضریب قدرت سیستم از  $\cos\Phi_L$  به یک می‌رسد.  
 ب) تنظیم ولتاژ: در شکل (۳-۵) در حالتی که جبران کننده وصل نشده باشد درصد تنظیم ولتاژ (رگولاسیون) طبق تعریف از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\% \text{ Reg} = \frac{|E| - |V|}{|V|} \times 100 \quad (۵-۹)$$

در این حالت قدرت جبران کننده  $Q_\gamma$  باید طوری انتخاب شود که با نصب آن، ولتاژ شین بار در حالت بارداری  $|V|$ ، با مقدار آن در حالت بی‌باری  $|E|$  برابر باشد. به این تریب درصد تنظیم ولتاژ (رگولاسیون) به صفر می‌رسد.

بنابر این یک جبران کننده باید طوری طرح شود که یکی از دو منظور (الف) و (ب) را عملی نماید. یعنی یا ضریب قدرت را به یک برساند و یا ولتاژ را ثابت نگاه دارد. از آنجا که مقدار توان راکتیو جبران کننده در دو حالت فوق متفاوت می‌باشد. لذا یک جبران کننده نمی‌تواند ضریب قدرت را به یک برساند و همزمان ولتاژ را نیز ثابت نگاه دارد.

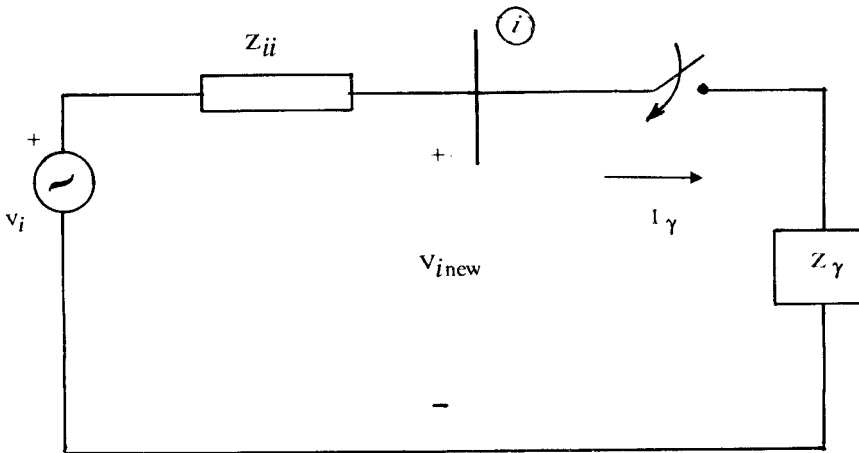
### ۵-۴-۲ جبران کننده ثابت موازی در سیستم بهم پیوسته

خازن‌ها و راکتورهای موازی جبران کننده‌های ثابتی هستند که برای تولید و یا مصرف توان راکتیو بطور موازی در شین‌های مناسب سیستم قدرت نصب می‌شوند. شکل (۵-۴) مدار معادل تونن یک سیستم قدرت را از دیدگاه شین شماره  $i$  نشان می‌دهد. ولتاژ تونن  $V_i$  از پخش بار بدست آمده است. امپدانس تونن  $Z_{ii} = Z_{ij}$  نیز با استفاده از ماتریس  $Z_{bus}$  تعیین می‌گردد. جبران کننده‌ای با قدرت راکتیو (مصرفی)  $Q_\gamma$  و ولتاژ نامی  $V_\gamma$  به شین  $i$  متصل شده‌است. راکتانس و امپدانس این جبران کننده عبارتست از:

$$X_\gamma = \frac{V_\gamma^2}{Q_\gamma} \quad (5-10)$$

$$Z_\gamma = \pm jX_\gamma \quad (5-11)$$

در این رابطه علامت مثبت برای راکتور و علامت منفی برای خازن بکار می‌رود. راکتور مصرف کننده توان راکتیو بوده و  $Q_\gamma$  برای آن مثبت می‌باشد. خازن نیز تولید کننده توان راکتیو است و  $Q_\gamma$  برای آن منفی در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۵-۴: جبران کننده ثابت موازی در سیستم قدرت

ولتاژ شین  $i$  پس از نصب جبران کننده از  $V_i$  به  $V_{inew}$  تغییر می‌یابد. جریان جبران کننده و ولتاژ جدید شین  $i$  بترتیب زیر محاسبه می‌شوند:

$$I_{\gamma} = \frac{V_i}{Z_{ij} + Z_{\gamma}} \quad (5-12)$$

$$V_{i_{new}} = V_i - Z_{ij}I_{\gamma} = Z_{\gamma} I_{\gamma} \quad (5-13)$$

ولتاژ شین‌های دیگر سیستم نیز با نصب جبران‌کننده در شین  $i$  تغییر می‌نمایند. ولتاژ جدید شین  $i$  برابر است با:

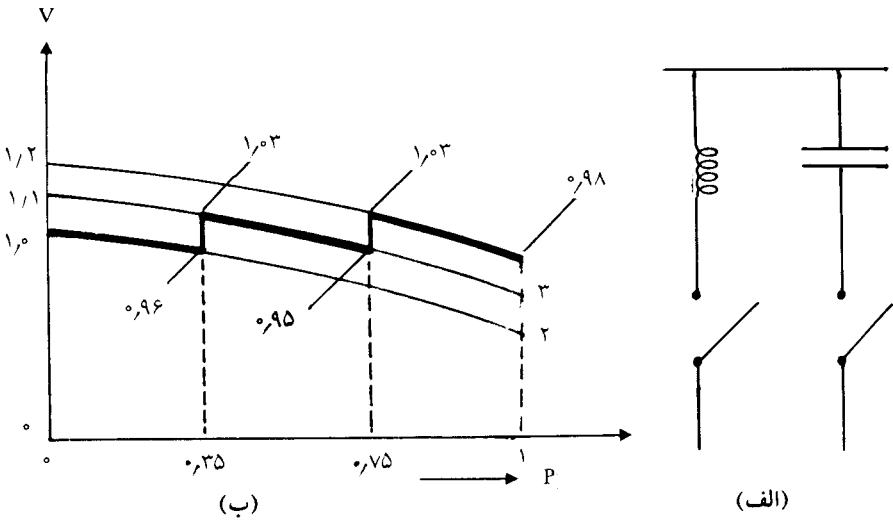
$$V_{j_{new}} = V_j - Z_{ji}I_{\gamma} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5-14)$$

که در آن  $V_j$  ولتاژ شین شماره  $j$  قبل از نصب جبران‌کننده و  $Z_{ji}$  عنصر موجود در سطر  $j$  و ستون  $i$  از ماتریس  $Z_{bus}$  می‌باشد.

برای محاسبات دقیق سیستم و تعیین پخش قدرت‌ها می‌توان  $Q_{\gamma}$  را در  $Q_D$  (قدرت راکتیو مصرفی بار) تأثیر داد و پخش بار سیستم را با  $Q_{D_{new}} = Q_D + Q_{\gamma}$  انجام داد تا ولتاژ شین‌ها و پخش قدرت‌ها را بدست آورد. همچنین می‌توان  $X_{\gamma}$  را در ماتریس  $Y_{bus}$  تأثیر داد و پخش بار را با  $Y_{bus}$  جدید انجام داد.

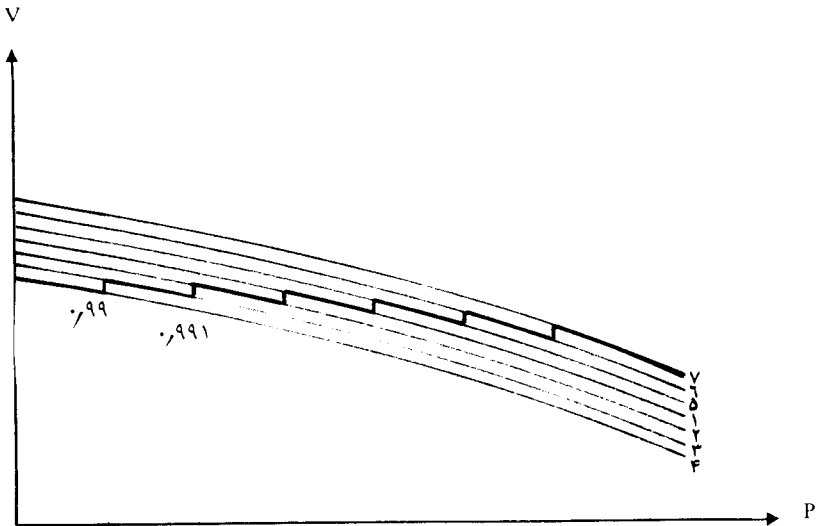
کنترل ولتاژ با استفاده از جبران‌کنندگی ثابت موازی بطریق فوق‌الذکر فقط در یک پله انجام می‌شود. برای کنترل مناسب ولتاژ، معمولاً از جبران‌کنندگی ثابت کنترل شده<sup>(۱)</sup> استفاده می‌شود که در آن خازن و راکتور هنگام لزوم قطع و وصل می‌شوند. شکل (۵-۵الف) اتصال خازن و راکتور کنترل شده را به شین مورد نظر نشان می‌دهد. کلیدهای نشان داده شده به حلقه‌های کنترل مربوط هستند و برای کار مناسب سیستم قطع و وصل می‌شوند. دیاگرام کنترل ولتاژ مربوطه نیز در شکل (۵-۵ب) نشان داده شده‌است.

منحنی ۱ مربوط به شرایط کار سیستم بدون جبران‌کننده و منحنی‌های ۲ و ۳ بترتیب برای جبران‌کنندگی با راکتور و خازن می‌باشند. همانطوریکه در شکل مذکور دیده می‌شود، از بی‌باری تا ۳۵٪ بار نامی راکتور متصل است. هنگامی که بار به ۳۵٪ مقدار نامی می‌رسد ولتاژ تا ۹۶PU/۰ کاهش یافته است. در اینجا راکتور قطع شده و ولتاژ بصورت پله‌ای به ۱۰۳PU/۰ می‌رسد. از ۳۵٪ تا ۷۵٪ بار نامی، سیستم بدون جبران‌کننده کار می‌کند و ولتاژ از ۱۰۳PU/۰ به ۹۵PU/۰ می‌رسد. در ۷۵٪ بار نامی خازن وصل می‌شود و ولتاژ از ۹۵PU/۰ به ۱۰۳PU/۰ افزایش می‌یابد و از این بپس تا رسیدن به بار نامی، ولتاژ از ۱۰۳PU/۰ تا ۹۸PU/۰ متغیر است. به این ترتیب ولتاژ این شین در فاصله ۹۵PU/۰ تا ۱۰۳PU/۰ کنترل شده‌است.



شکل ۵-۵: کنترل ولتاژ بوسیله جبران کنندگی ثابت کنترل شده

برای کنترل دقیق تر می توان حالتی را در نظر گرفت که چندین راکتور و خازن موازی در زمانهای مناسب قطع و وصل می شوند و کنترل ولتاژ در محدوده باریکتری (مثلاً  $\pm 1\%$ ) انجام می شود. شکل (۵-۶) دیاگرام کنترل ولتاژ چنین حالتی را نشان می دهد.

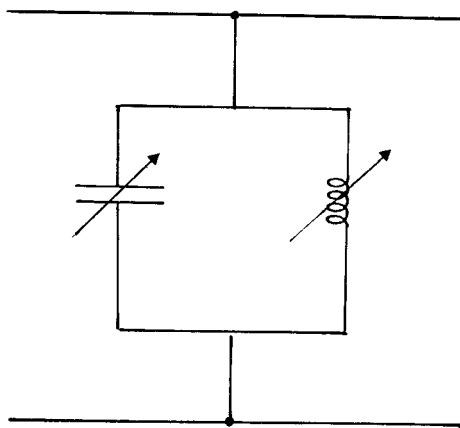


شکل ۵-۶: دیاگرام کنترل ولتاژ با نصب خازنها و راکتورهای چند مرحله ای

منحنی شماره ۱ مشخصه ولتاژ - قدرت را برای حالت بدون جبران کننده نشان می‌دهد. منحنی‌های ۲ و ۳ و ۴ بترتیب مربوط به اتصال یک، دو و سه راکتور، و منحنی‌های ۵ و ۶ و ۷ بترتیب مربوط به اتصال یک، دو و سه خازن می‌باشند.

### ۳-۴-۵ جبران کننده‌های دینامیک (۱)

کنترل ایده‌آل آنست که مشخصه ولتاژ - قدرت، خط مستقیمی بدون شیب (ولتاژ ثابت) باشد. برای این کار از لحاظ تئوری باید تعداد بی‌نهایت خازن و راکتور بصورت موازی در شین مورد کنترل نصب شده و با کوچکترین تغییر در بار سیستم، قطع و وصل شوند. کنترل و تثبیت ولتاژ بطور لحظه‌ای در عمل توسط کندانسورهای سنکرون (۲) و جبران کننده‌های استاتیک (۳) امکان پذیر است. در حقیقت مدار معادل این جبران کننده‌ها را می‌توان مطابق شکل (۵-۷) بصورت یک ساسپتانس (۴) قابل تنظیم در هر دو جهت خازنی و سلفی در نظر گرفت. در این جبران کننده‌ها، چنانچه ولتاژ در محل اتصال جبران کننده از حدود تعیین شده منحرف شود، مدار کنترل مربوطه ساسپتانس موازی را طوری تغییر می‌دهد که مجدداً ولتاژ به حدود تعیین شده برگردد. از آنجائیکه اصولاً نحوه عمل این جبران کننده‌ها پیوسته و دینامیک می‌باشد، آنها را جبران کننده‌های دینامیک می‌نامند.



شکل ۵-۷: مدار معادل یک جبران کننده دینامیک

- 
- 1- Dynamic Compensator      2-Synchronous Condenser      3- Static Compensator  
4- Susceptance

کندانسور سنکرون یک ماشین سنکرون است که پس از راه‌اندازی، با شبکه سنکرونیزه می‌شود. مدار کنترل ولتاژ این ماشین، وظیفه اندازه‌گیری انحراف ولتاژ و کنترل تحریک را بعهده دارد. با کنترل تحریک، ماشین در رژیم‌های کار مورد نیاز، فوق تحریک و یا زیر تحریک، توان راکتیو تولید و یا جذب می‌نماید تا ولتاژ ترمینالهای کندانسور را در مقدار ثابتی تنظیم نماید. در حقیقت مدار کنترل ولتاژ در کندانسورهای سنکرون مشابه سیستم کنترل ولتاژ اتوماتیک (AVR) ژنراتورها است که در بخش (۱-۲-۵) مورد بحث قرار گرفت. لیکن در سیستم‌های قدرت مدرن امروزه، بخاطر کند بودن سرعت پاسخ سیستم کنترل، ظرفیت محدود قدرت راکتیو، مصرف توان اکتیو و همچنین ملاحظات پایداری، از کندانسورهای سنکرون کمتر استفاده می‌شود.

در حال حاضر استفاده از جبران‌کننده‌های استاتیک در سیستم‌ها رو به افزایش است. در این جبران‌کننده‌ها عمل کنترل ولتاژ توسط یک ساسپتانس قابل کنترل انجام می‌شود. مدار کنترل این جبران‌کننده‌ها ولتاژ را اندازه‌گیری نموده و فرمان کنترل از طریق پالس‌هایی با زاویه آتش مناسب، کنترل‌کننده‌های تریستوری را بکار می‌اندازند و عمل کنترل ساسپتانس با کنترل زاویه آتش تریستورها انجام می‌شود. از آنجا که این جبران‌کننده‌ها دارای قطعات دوار نیستند (وبه همین علت استاتیک نامیده می‌شوند)، مسأله پایداری ندارند. از طرف دیگر سرعت پاسخ آنها بسیار خوب بوده (یک تا دو سیکل) و توان اکتیو ناچیزی مصرف می‌نمایند. جبران‌کننده‌های استاتیک دارای انواع زیادی هستند. مهمترین آنها عبارتند از:

- ۱- راکتور کنترل شده با تریستور<sup>(۱)</sup> TCR
- ۲- خازن سویچ شده با تریستور<sup>(۲)</sup> TSC
- ۳- راکتور اشباع شده<sup>(۳)</sup> SR

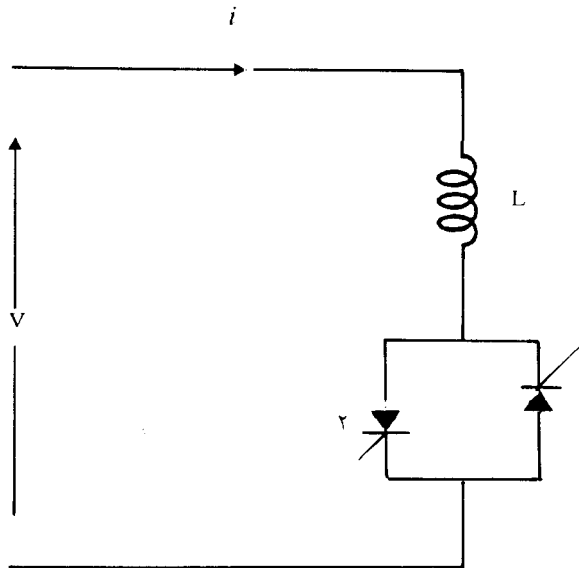
ساختمان TCR بطور شماتیک در شکل (۸-۵) نشان داده شده است. عنصر کنترل کننده، مدار کنترل کننده تریستوری است و شامل دو تریستور موازی است که قطب‌های غیر همنام آنها بهم متصل شده‌اند.

اگر تریستور شماره ۱ در زاویه آتش  $\alpha = 90^\circ$  و تریستور ۲ در زاویه آتش  $\alpha = 270^\circ$  روشن شوند هدایت کامل صورت می‌گیرد و اگر تریستورها بترتیب در زاویه‌های آتش  $90^\circ$  تا  $180^\circ$

1- Thyristor - Controlled Reactor

2- Thristor - Switched Capacitor

3- Saturated Reactor



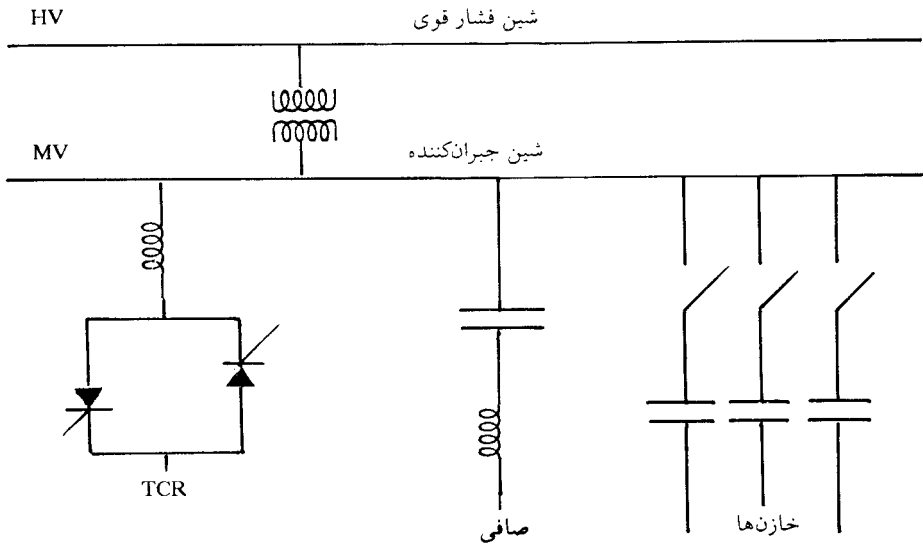
شکل ۸-۵: شمای راکتور کنترل شده با تریستور TCR

$27^{\circ}$  تا  $36^{\circ}$  روشن شوند هدایت ناقص بوده و مقدار مؤثر جریان کمتر خواهد بود و این بمنزله افزایش اندوکتانس و کاهش قدرت راکتیو مصرفی راکتور است. بنابراین این TCR یک ساسپتانس قابل کنترل بوده که حداقل اندوکتانس آن  $L$  بوده و تا حدود مورد نیاز قابل افزایش می باشد.

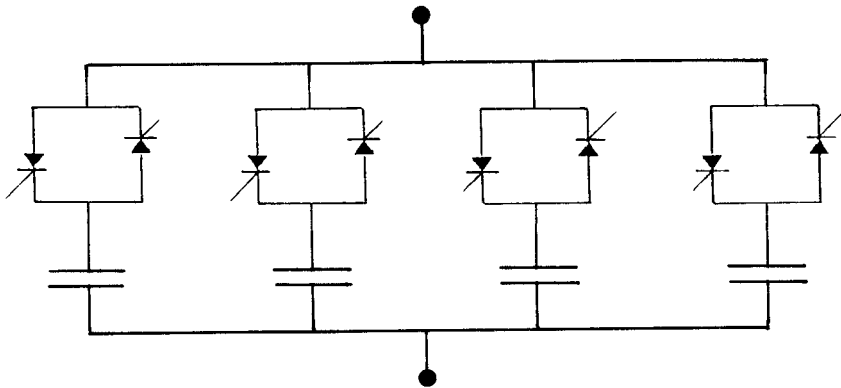
جریان TCR همیشه پس فاز بوده و TCR فقط قدرت راکتیو مصرف می کند. اگر یک خازن با TCR موازی شود می تواند ضریب قدرت پیش فاز نیز برای جبران کننده ایجاد کند و قدرت راکتیو کنترل شده به شبکه تزریق نماید. برای کنترل بیشتر و بهتر می توان چند خازن موازی با TCR را قطع و وصل نمود. شمای اتصال این جبران کننده استاتیک که به  $(TCR/FC)^{(1)}$  موسوم است در شکل (۹-۵) نشان داده شده است. در این شکل صافی نشان داده شده برای حذف هارمونی های ایجاد شده توسط TCR می باشد.

در خازن سویچ شده با تریستور TSC، ساسپتانس قابل تنظیم با کنترل تعداد خازنهائی که بطور اتوماتیک با کلیدهای تریستوری قطع و وصل می شوند بدست می آید. به این ترتیب کنترل ساسپتانس فقط بصورت پله ای انجام می شود. در شکل (۱۰-۵) مدار یک فاز این جبران کننده نشان داده شده است.





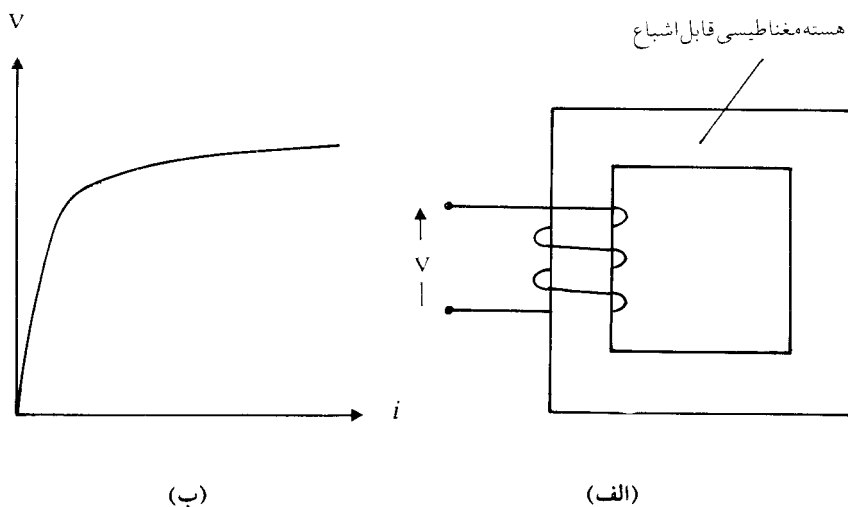
شکل ۹-۵: شمای اتصال TCR/FC به شبکه قدرت



شکل ۱۰-۵: اساس کار TSC

مدار کنترل اتوماتیک TSC، با اندازه‌گیری ولتاژ، فرمان لازم را به تریستورهائی که باید خازن‌ها را قطع و یا وصل نمایند صادر می‌کند. اگر ولتاژ از "محدوده کنترل ولتاژ" کمتر باشد خازن‌ها یکی پس از دیگری وصل می‌شوند تا جائیکه ولتاژ به محدوده کنترل برگردد، و اگر ولتاژ بیشتر از محدوده کنترل باشد تعدادی از خازن‌ها قطع می‌شوند تا ولتاژ مجدداً به محدوده قابل قبول کنترل برگردد.

شکل (۱۱-۵ الف) ساختمان راکتور اشباع شده SR را نشان می‌دهد. وسیله کنترل در این جبران کننده یک هسته مغناطیسی قابل اشباع است که مشخصه ولتاژ - جریان آن در شکل (۱۱-۵ ب) نشان داده شده است. مشخصه TCR نیز تقریباً شبیه مشخصه SR می‌باشد.



شکل ۱۱-۵: ساختمان راکتور اشباع شده و مشخصه ولتاژ - جریان آن

### ۵-۵ خازن سری (۱)

- نصب خازن سری در یک خط انتقال بلند باعث کاهش راکتانس القایی خط شده و نتایج زیر را بدست خواهد داد:
- الف) افزایش قدرت انتقالی ماکزیمم و بهبود پایداری ماندگار
  - ب) افزایش بار طبیعی خط
  - ج) کاهش زاویه انتقال در یک قدرت داده شده
  - د) کاهش تلفات خط
  - ه) کاهش افت ولتاژ در طول خط
  - و) بهبود پایداری گذرا
  - ز) کاهش حساسیت ولتاژ به اختلالات در حالت گذرا

رابطه زیر درجه جبران کنندگی سری  $K_{sc}^{(1)}$  را تعریف می‌نماید:

$$K_{sc} = \frac{X_{cy}}{X_L} \quad (5-15)$$

که در آن  $X_L$  راکتانس القائی خط و  $X_{cy}$  راکتانس خازن سری می‌باشد. اگر مقدار  $K_{sc}$  زیاد و نزدیک عدد یک انتخاب شود، راکتانس سری خیلی کم شده و جریان آن بسیار زیاد می‌شود. از طرف دیگر ممکن است رزونانس سری ایجاد شود که در اینصورت کنترل ولتاژها و جریانهای حالت گذرا بر اثر اختلالات بوجود آمده بسیار مشکل خواهد بود. معمولاً  $K_{sc}$  در حدود ۰/۲۵ تا ۰/۷ انتخاب می‌شود. راکتانس خط با اضافه شدن خازن سری برابر است با:

$$X = X_L - X_{cy} = X_L - K_{sc} X_L = X_L (1 - K_{sc})$$

چنانچه از کاپاسیتانس خط صرف‌نظر کنیم، با جایگزین کردن راکتانس  $X$  در رابطه انتقال قدرت خط انتقال داریم:

$$P = \frac{|V_s| |V_r|}{X_L(1 - K_{sc})} \sin \delta \quad (5-16)$$

که در آن  $|V_s|$  و  $|V_r|$  به ترتیب ولتاژهای ابتدا و انتهای خط انتقال می‌باشند. این رابطه نشان می‌دهد که قدرت انتقالی ماکزیمم با افزایش درجه جبران کنندگی سری افزایش می‌یابد. همچنین در قدرت داده شده  $P$ ، زاویه  $\delta$  کاهش می‌یابد و این دو عامل باعث افزایش پایداری ماندگار و پایداری گذرای سیستم خواهند شد. درحقیقت نقش اصلی خازن سری در بهبود پایداری خطوط انتقال بلند است.