بخش نهم: راکتورها

مدرس: دکتر علی کریمی

راکتور قدرت

- راکتورهای شبکه قدرت در دو دسته بندی کلی راکتورهای سری و راکتورهای موازی تقسیم بندی می شوند که از نظر ساختمانی و وظیفه با هم متفاوتند.
- راکتورهای سری برای محدودکردن جریان اتصال کوتاه، تقسیم بار در خطوط موازی و جلوگیری از تغییرات ناگهانی جریان استفاده می شود.
- برخی از راکتورهای اتصال موازی برای محدودکردن جریان زمین بکار می روند (Earthing Reactor). این راکتورها در محدود کردن جریان اتصال کوتاه تک فاز بسیار موثرند.
- داشتن نقطه نوترال متصل به زمین از لحاظ حفاظتی، عایقی و در برخی موارد از نظر ایمنی اهمیت زیادی دارد. از اینرو، راکتورها یا ترانسفورماتورهایی به صورت اتصال موازی برای ایجاد نوترال سیستم به کار می روند.
- راکتورهای میراکننده (Damping Reactor) به صورت اتصال سری برای محدودکردن جریان هجومی خازن ها در شرایط کلیدزنی به کار می روند.
- راکتورهای تنظیم کننده (فیلتر) که به صورت اتصال سری یا موازی با خازن قرار می گیرند و وظیفهٔ آنها فیلتر کردن هارمونیک ها و یا فرکانس های مخابراتی است.
- راکتورهای شنت یا موازی (Shunt Reactor) در شبکه های HV و EHV به منظور کاهش خاصیت خازنی به وجود آمده توسط خطوط هوایی و یا کابل ها استفاده می شوند و دو کارکرد پایداری سیستم از نظر خاصیت خازنی خط و کنترل ولتاژ و جذب توان راکتیو در شرایط کم باری را دارند.

❖ کارکرد راکتورهای موازی:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

✓ ولتاژ و جریان ابتدای خطوط انتقال نسبت به ولتاژ و جریان انتهای خط:

✓ ولتاژ خطوط در شرایط بی باری:

$$V_{R,NL} = \frac{V_S}{A} \Rightarrow \begin{cases} V_{R,NL} = V_S & for\ short\ lines \\ V_{R,NL} = \dfrac{V_S}{1 + \dfrac{Z.Y}{2}} & for\ medium\ lines \\ V_{R,NL} = \dfrac{V_S}{\cosh \gamma l} & for\ long\ lines\ ,\ \gamma = \sqrt{z.y} \end{cases}$$

✓ با توجه به روابط فوق، درصورتی که خطوط متوسط و بلند بدون بار ($I_R=0$) و یا کم بار (I_R کوچک) شوند، احتمال اضافه ولتاژ در خطوط به شدت بالا می رود و ممکن است به تجهیزات شبکه آسیب برساند. بنابراین، باید در دو طرف خط انتقال (در داخل پست های طرفین خط) راکتورهای موازی نصب گردد.

راکتور قدرت موازی

- راکتورهای موازی، علاوه بر جبران خازن خطوط انتقال و جلوگیری از افزایش ولتاژ انتهای خطوط کم بار یا بی بار، برای بهبود شرایط سنکرونایزینگ خط انتقال با شبکه و بهبود شرایط باز-وصل (Recloser) تکفاز مورداستفاده قرار می گیرد:
  - ✓ با توجه به نوع کاربرد می توان راکتور را بر روی شینه بندی، در دو انتهای خط انتقال و یا بر روی سیم پیچ ثالثیه ترانسفورماتور قرار داد.
  - ✓ راکتور سر خط معمولا با سکسیونر به خط انتقال متصل شده و در نتیجه قابل قطع و وصل در خط برق دار نیستند (Nonswitchable) و برای کنترل و حفاظت آنها از کلید قدرت خط انتقال استفاده می شود. راکتورهای شینه بندی و نیز راکتور متصل به سیم پیچ ثالثیه ترانسفورماتور معمولا مجهز به کلید قدرت بوده و لذا قابل قطع و وصل (Switchable) هستند.

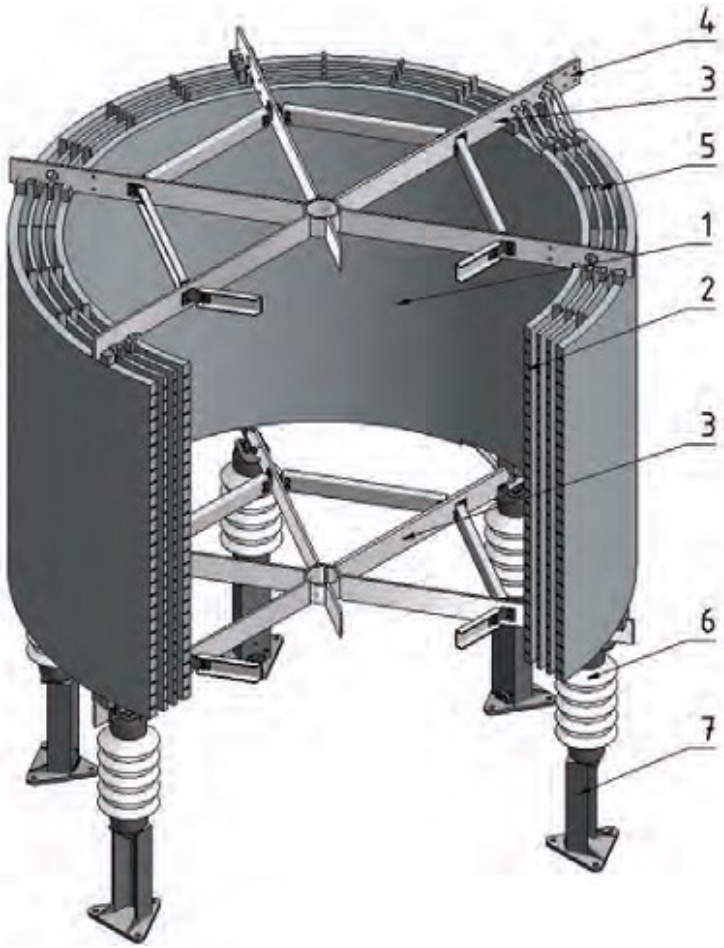
انواع راکتور موازی

۱) راکتورهای موازی روغنی که شامل هسته، سیم پیچی مسی و روغن بوده و به لحاظ ساختمانی شبیه ترانسفورماتورهای قدرت می باشند. به طور معمول، اکثر راکتورهایی که برای جبرانسازی خازن خط استفاده می شوند (مانند ابتدا و انتهای خطوط 400kV بلند) از نوع روغنی هستند.

- ✓ راکتورهای روغنی سه فاز، از سه سیم پیچی تشکیل شده که هر سیم پیچ روی یک ستون هسته پیچیده می شود؛ ولی عملاً اکثر راکتورهای سه فاز به صورت ۵ ستونه طراحی می شوند که ۲ ستون آن بدون سیم پیچ است. دلیل طرح راکتورهای ۵ ستونه، تساوی مقدار امپدانس مولفهٔ مثبت (Z^+) و امپدانس مولفه صفر ($Z0$) است.
- ✓ این راکتورها معمولا با سیستم خنک کنندگی ONAN (Oil Natural Air Natural) طراحی می شوند که رادیاتورها مستقیما به بدنه راکتور متصل می گردند. ولی در مواردی به صورت ONAN/ONAF/OFAF هم می باشند.

ONAF: Oil Natural Air Forced , OFAF: Oil Forced Air Forced

۲) راکتورهای موازی بدون هسته یا خشک و یا زرهی (Dry-Type, Air-Core Shunt Reactors) با سیم پیچ های آلومینیومی که چگالی شار آنها نسبت به روغنی کمتر است و معمولا دارای سیم پیچ ها قطور هستند (کاربرد آنها بیشتر در ولتاژ های پایین است). در اطراف این راکتورها نباید پوشش یا تانک فلزی باشد، چون القای الکترومغناطیسی خواهیم داشت (در فاصله ای حدود نصف قطر راکتور)

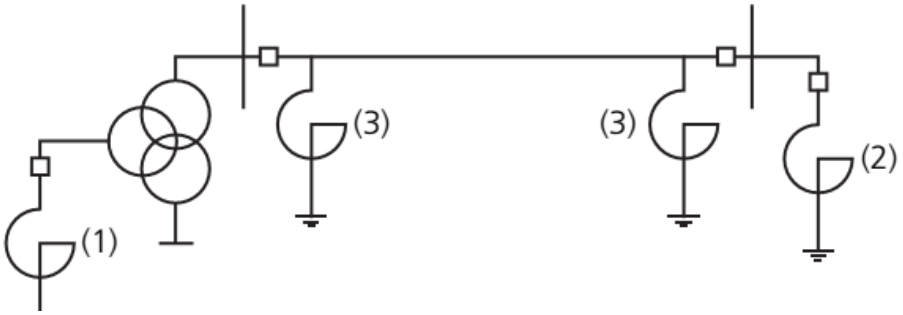


1. winding
2. winding conductor
3. spider
4. terminal
5. duct stick
6. base insulator
7. mounting bracket

Main advantages of air-core, dry-type:

- ✓ no environmental concern, no oil collection system required
- ✓ no fire hazard, no fie deluge system
- ✓ essentially no efforts and ongoing costs for maintenance
- ✓ less civil work, lower weight
- ✓ less efforts for transport and handling
- ✓ simplicity of insulation to ground (self healing)
- ✓ no risk of bushing failures
- ✓ no excessive magnetizing inrush current–no iron core
- ✓ typically lower investment cost

انواع راکتور موازی



۲) راکتورهای موازی بدون هسته یا خشک

محل نصب: (۱)، (۲) و (۳)

این راکتورها همچنین به عنوان فیلتر نیز استفاده می شوند.

نصب در سیم پیچی ثالثیه ترانسفورماتور قدرت:

20 kV, 45 Mvar 3-phase, 50 Hz

انواع راکتور موازی

۲) راکتورهای موازی بدون هسته یا خشک

نصب در ابتدا و انتهای خطوط فشار قوی (در برخی موارد استفاده می شود، در ایران راکتورهای خط روغنی هستند):

132 kV, 20 Mvar 3-phase shunt reactor (2 banks)

345 kV, 20 Mvar 3-phase shunt reactor

راکتور قدرت سری

- راکتورهای سری نیز در دو نوع روغنی و خشک استفاده می شوند (بیشترین کاربرد آنها محدود کردن جریان اتصال کوتاه و کنترل جریان های خازنی و فیلترهای فرکانس بالا است.
- در صورتی که در این راکتورها هسته بکار رود، در شرایط اتصال کوتاه (با توجه به سری بودن) نباید راکتانس آنها خیلی کاهش یابد. به هر حال، در راکتورهای دارای هسته، پدیدهٔ اشباع در جریان های بالای جریان نامی رخ می دهد و ساخت راکتورهای با راکتانس ثابت بسیار گران تمام می شود.
- به طور کلی، راکتورهای سری محدود کنندهٔ جریان اتصال کوتاه یا به صورت خشک هستند و یا روغنی با فاصله هوایی.
  - ✓ راکتورهای خشک در برابر جریان اتصال کوتاه مقاومند و راکتانس آنها در شرایط عادی و اتصال کوتاه تقریبا یکسان است. از معایب این راکتورها خنک سازی با fan است که بازدهی خوبی ندارد.
  - ✓ بخش های اصلی راکتورهای روغنی سری شامل بدنه، سیم پیچ و عایق بندی است. در این راکتورها، سیم پیچ ها درون روغن قرار دارند و مشکل پراکندگی شار مغناطیسی با قرار دادن تعدادی ورقهٔ آهنی در اطراف سیم پیچی راکتور حل می شود. ورقه های آهنی همچون یک قفس اطراف سیم پیچ نصب می گردند و از یکدیگر عایق می شوند (چرا؟). در شرایط عادی، راکتانس ۱۰ تا ۱۵ درصد بیش از شرایط اتصال کوتاه است.
- کمیت های مهم در راکتورها شامل ولتاژ نامی، جریان پیوسته نامی، فرکانس نامی، جریان کوتاه مدت نامی، مدت زمان عبور جریان اتصال کوتاه (۳ ثانیه) و سطح BIL است (این کمیت ها در فصل اول معرفی شدند).
- علاوه بر کمیت های فوق، برخی کمیت های دیگر عبارتند از:
  - ✓ امپدانس نامی: امپدانس هر فاز در فرکانس نامی؛ با توجه به اینکه این راکتورهای سری هستند سطح مقطع سیم پیچ ها زیاد بوده و بنابراین، مقاومت سیم پیچ ها ناچیز و حدود ۳ درصد راکتانس می باشد:

$$X_R = \frac{U_n}{\sqrt{3}.I_n}$$

راکتور قدرت سری

✓ افت ولتاژ نامی: این کمیت معرف ولتاژ القا شده در دو سر راکتور در اثر عبور جریان پیوسته نامی است.

$$\Delta U_R = I_n X_R$$

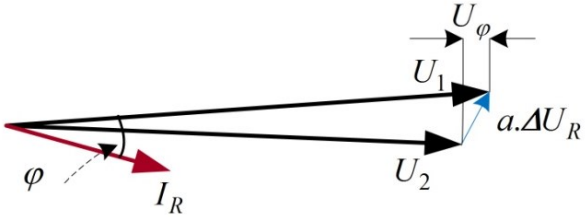
$$\%\Delta U_R = \frac{\Delta U_R}{U_n/\sqrt{3}} \times 100 \Rightarrow \%\Delta U_R = \frac{I_n X_R}{U_n/\sqrt{3}} \times 100 = \frac{X_R}{Z_{base}} \times 100 = \%X_R$$

به طور مثال برای یک راکتور سری سه فاز با امپدانس 5% در ولتاژ 33kV که جریان نامی آن ۴۰۰ آمپر است، افت ولتاژ برابر 953V است.

با نصب راکتور سری، اندازهٔ ولتاژ به اندازهٔ افت ولتاژ روی راکتور تغییر می کند: U_φ

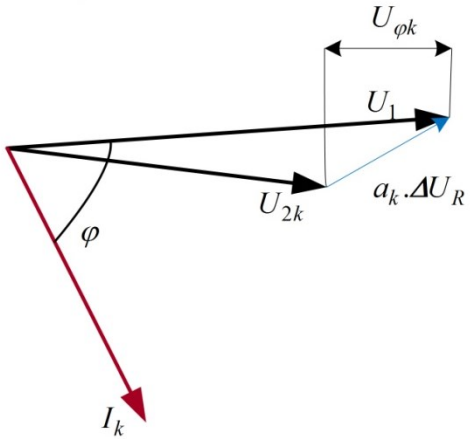
این تغییر ولتاژ به ضریب قدرت بستگی دارد (در اتصال کوتاه ضریب قدرت نزدیک به صفر است و این تغییر نسبتا بزرگ است).

ولتاژ شبکه پس از راکتور: U_2 ولتاژ شبکه قبل از راکتور: U_1



$$U_\varphi = a.\Delta U_R.\cos(90-\varphi) = a.\Delta U_R.\sin\varphi$$

$$a = \frac{I}{I_n}$$



$$U_{\varphi k} = a_k.\Delta U_R.\sin\varphi_k$$

$$a_k = \frac{I_k}{I_n}$$

راکتور قدرت سری

مثال: در صورتی که شبکه در شرایط نامی (حامل جریان نامی)، دارای ضریب قدرت 0.8 باشد، آنگاه برای یک راکتور سری با افت ولتاژ نامی ۶ درصد، تغییرات ولتاژ شبکه برابر است با:

$$I = I_n \Rightarrow a = 1$$

$$U_\varphi = a.\Delta U_R.\sin\varphi = 1\times\%6\times\sin(\cos^{-1}0.8) = \%6\times0.6 = \%3.6$$

- ✓ توان ظاهری نامی برای راکتور سری:

$$S_n = 3.\Delta U_R.I_n$$

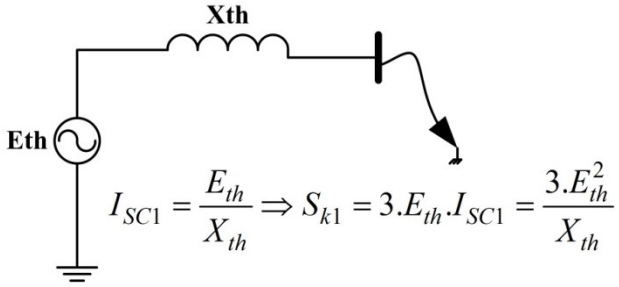
- ✓ توان ظاهری عبوری از راکتور سری:

$$S_D = \sqrt{3}.U_n.I_n$$

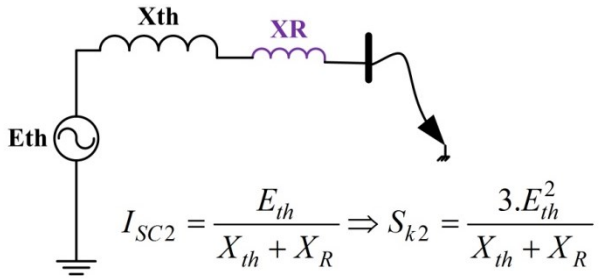
- ✓ تعیین راکتانس راکتور سری: درصورتی که قدرت اتصال کوتاه در یک شبکه برابر S_{k1} باشد و بخواهیم آن را تا سطح S_{k2} کاهش دهیم، راکتانس موردنیاز راکتور سری بر حسب پریونیت عبارت است از:

$$X_R^{pu} = S_D.\frac{S_{k1}-S_{k2}}{S_{k1}.S_{k2}}$$

راکتور قدرت سری



$$I_{SC1} = \frac{E_{th}}{X_{th}} \Rightarrow S_{k1} = 3.E_{th}.I_{SC1} = \frac{3.E_{th}^2}{X_{th}}$$



$$I_{SC2} = \frac{E_{th}}{X_{th} + X_R} \Rightarrow S_{k2} = \frac{3.E_{th}^2}{X_{th} + X_R}$$

اثبات راکتانس راکتور سری:

$$X_R = 3.E_{th}^2.(\frac{1}{S_{k2}} - \frac{1}{S_{k1}}) = 3.E_{th}^2.\frac{S_{k1} - S_{k2}}{S_{k1}.S_{k2}}$$

$$\Rightarrow X_R^{pu} = \frac{X_R}{Z_{base}} = \frac{3.E_{th}^2}{E_{th}/I_n}.\frac{S_{k1} - S_{k2}}{S_{k1}.S_{k2}} = S_D.\frac{S_{k1} - S_{k2}}{S_{k1}.S_{k2}}$$

مثال) در یک شبکه 6kV با جریان نامی 600A، می خواهیم قدرت اتصال کوتاه را از 600MVA به 100MVA کاهش دهیم. راکتانس موردنیاز راکتور سری و درصد افت ولتاژ روی آن را محاسبه کنید.

$$X_R^{pu} = S_D.\frac{S_{k1} - S_{k2}}{S_{k1}.S_{k2}} = \left(\sqrt{3} \times 6kV \times 0.6kA\right) \times \frac{600 - 100}{600 \times 100} = 0.052\, pu. = \%5.2$$

اگر بخواهیم برای محاسبه اتصال کوتاه ضریبی (مثلا ضریب 1.1) برای اطمینان در نظر بگیریم ($I_{sc}=1.1.E_{th}/X_{th}$):

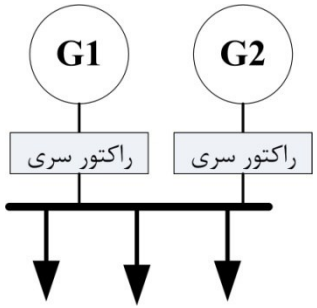
$$X_R^{pu} = 1.1 \times S_D.\frac{S_{k1} - S_{k2}}{S_{k1}.S_{k2}} = \%5.7$$

طبق استاندارد، راکتور ۶ درصد داریم، بنابراین: $\%\Delta U_R = \%X_R = \%6$

مکان راکتور قدرت سری

❖ به طور کلی، برای به کار بردن راکتور سری از سه روش **راکتور ژنراتور**، **راکتور خط** و **راکتور شین** استفاده می‌شود.

1. **راکتور ژنراتور:** اغلب ژنراتورهای مدرن به گونه‌ای طراحی می‌شوند که برای تحمل جریان‌های اتصال کوتاه روی پایانه‌های خود از راکتانس کافی برخوردار باشند. نیروگاه‌های قدیمی به این‌صورت طراحی نمی‌شدند، بنابراین در برخی از آن‌ها، می‌توان راکتورهای سری شده با ژنراتورها را دید. راکتور می‌تواند جریان اتصال کوتاهی را محدودکند که از دیگر ژنراتور به سمت ژنراتور اتصالی شده می‌آید.



در این شرایط، آسیب‌های ناشی از جریان‌های اتصال کوتاه کاهش می‌یابد و قدرت لازم برای مدارشکن های نیروگاه می‌تواند کمتر باشد.

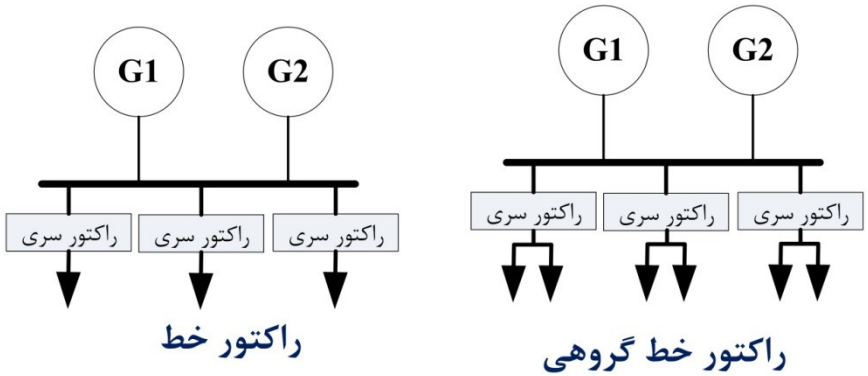
معایب این روش:

- ✓ در صورت وقوع اتصالی روی یکی از فیدرهای خروجی، ولتاژ شین که نقطه مشترک فیدرهاست، شدیداً کاهش می‌یابد و فیدرهای سالم نیز با عملکرد تجهیزات حفاظت ولتاژ پایین (Under Voltage Protection) از مدار خارج می‌شوند (چرا؟). به این ترتیب، احتمال از دست رفتن همگامی نیروگاه با شبکه افزایش می‌یابد.
- ✓ اگر اتصال‌کوتاه روی شین رخ دهد، جریان خطای شبکه شبکه به وسیله‌ی راکتورها محدود نمی‌شود.
- ✓ در شرایط عادی، کل جریان ژنراتورها از راکتورها عبور می کند که افت ولتاژ و تلفات دائمی را در پی دارد.

به همین دلایل، از این طرح تنها در نیروگاههای قدیمی استفاده شده است.

مکان راکتور قدرت سری

2. **راکتور خط:** هدف از کاربرد راکتور برای فیدر، کاهش سطح اتصال کوتاه روی فیدر است و نتیجه آن استفاده از تجهیزات قدرت، به طور عمده مدارشکن، با قدرت قطع کمتر است. در مقایسه با راکتور ژنراتور، اتصالی روی فیدر با وجود راکتور باعث افت ولتاژ شدید شین نمی‌شود، در نتیجه خطر خارج شدن سایر فیدرها و از دست رفتن همگامی کمتر است. اما بخشی از جریان خطای شین که از طرف ژنراتورها پدید آمده است، از راکتور نمی‌گذرد و بنابراین محدود نمی‌شود.

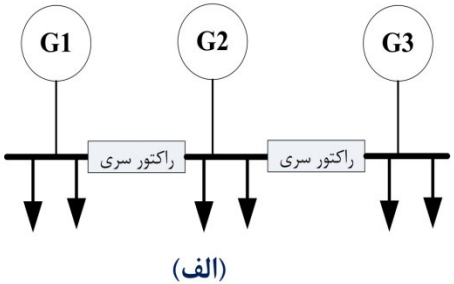


- ✓ در این روش، تلفات و افت چند درصدی ولتاژ همانند اتصال به ژنراتور وجود دارد.
- ✓ طرح دوم که اتصال گروهی راکتور خط نامیده می‌شود، فقط از نظر اقتصادی سودمند است، ولی چنانچه به هر دلیل راکتور نیاز به تعمیرات داشته باشد، کلیه فیدرهای متصل به آن را باید از مدار خارج کرد.
- ✓ اتصال گروهی بیشتر در سیستم‌های توزیع تا ولتاژ ۳۳kV استفاده می‌شود.

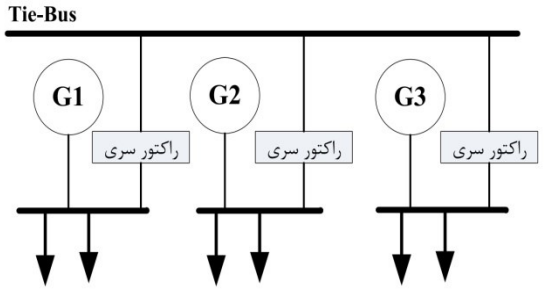
مکان راکتور قدرت سری

3. **راکتور شین:** چنانچه اشاره شد دو عیب عمده مشترک بین راکتور خط و راکتور ژنراتور وجود تلفات اهمی و افت چند درصدی ولتاژ است. با نصب راکتور روی شین این معایب تا حدود زیادی برطرف می‌شود. سه طرح معمول در این طرح عبارتند از:

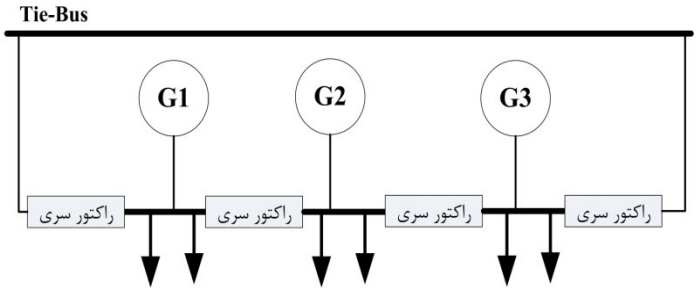
- ❖ **راکتور شین با اتصال سری بین بخش های شین (شکل الف):** در این طرح باسبار به چند بخش (معمولا به تعداد ژنراتورها) تقسیم می‌شود و هر بخش از شین از طریق یک راکتور به بخش مجاور متصل می گردد.
- ❖ **راکتور شین با اتصال موازی بین بخش‌های شین و شین مشترک (شکل ب):** در این طرح هر بخش از شین توسط یک راکتور به یک شین مشترک که Tie Bus نامیده می‌شود، وصل می‌گردد.
- ❖ **اتصال به صورت حلقوی (شکل ج):** این اتصال همانند اتصال سری است ولی توسط یک شین Tie Bus به صورت حلقه در می‌آید.



(الف)



(ب)

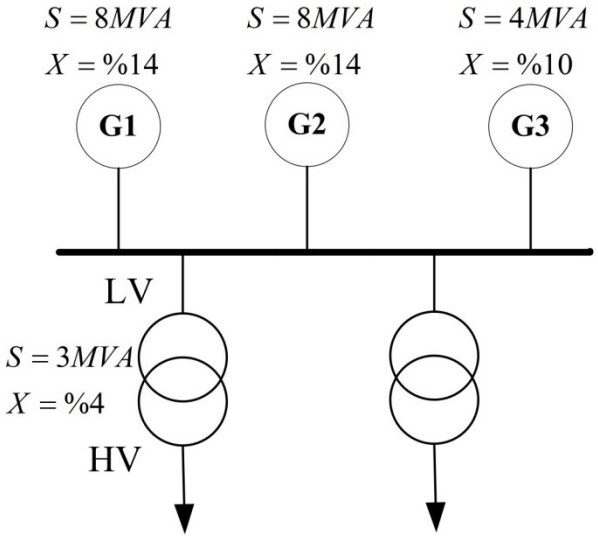


(ج)

راکتور قدرت سری

- جریان اتصال کوتاه در شبکه‌های بزرگ و به هم پیوسته در برخی نقاط شبکه می تواند بسیار بزرگ باشد و در کنار روش های دیگر محدودسازی اتصال کوتاه (مانند چندپاره سازی شین، تغییرات در پیکره بندی شبکه، ترانسفورماتورهای امپدانس‌بالا، پیوندهای تشدیدی، روش های نوین مانند ابررساناها و ...)، می‌توان از راکتور سری استفاده کرد.
- در توسعه سیستم قدرت نیز گاهی در نقاطی از شبکه جریان اتصال کوتاه می‌تواند از مقادیر مجاز تجهیزات نصب شدهٔ قبلی بیشتر شود. برای مثال مدارشکن‌های موجود ممکن است جریان قطع کمتری نسبت به آنچه که پس از توسعه وجود خواهد داشت، داشته باشند در این مورد یا باید تجهیزات را تعویض کرد و یا سطح اتصال کوتاه را پایین نگه داشت. تعویض تجهیزات معمولاً از نظر اقتصادی هزینه بالاتری نسبت به نصب محدودکننده اتصال کوتاه دارد و بنابراین کاربرد راکتور سری ممکن است مدنظر قرار گیرد.

مثال: با توجه به شکل زیر، سه ژنراتور از طریق یک شین مشترک، دو فیدر بار را تغذیه می کنند. ترانسفورماتورهای فیدرها مشابه هستند. با انتخاب Sbase=8MVA (ضریب 1.1 را برای محاسبات اتصال کوتاه در نظر بگیرید):



الف) سطح اتصال کوتاه دو طرف ترانسفورماتورها را محاسبه کنید؟

ب) در صورتی که بخواهیم سطح اتصال کوتاه بخش LV هر ترانسفورماتور، به 120MVA کاهش یابد، راکتور سری مناسب را طراحی کنید.

حل الف:

$$\begin{cases} X_{G1} = \%14 \\ X_{G2} = \%14 \\ X_{G3} = \%10 \times \dfrac{8}{4} = \%20 \\ X_T = \%4 \times \dfrac{8}{3} = \%10.66 \end{cases}$$

$$in\,LV\ side: X_{Geq} = X_{G1} \parallel X_{G2} \parallel X_{G3} = \%5.19 \Rightarrow SCC_1 = \frac{1.1}{\%5.19} \times 8MVA = 169.6MVA$$

$$in\,HV\ side: SCC_2 = \frac{1.1}{X_{Geq} + X_T} \times 8MVA = 55.52MVA$$

حل ب: قدرت اتصال کوتاه باید از 169.6MVA به 120MVA کاهش یابد (محل نصب راکتور، سمت LV ترانس و قبل از مدارشکن ترانس است).

$$X_R^{pu} = 1.1 \times 8MVA. \frac{169.6 - 120}{169.6 \times 120} = 0.021pu. = \%2.1$$