

بررسی سیستم‌های قدرت ۲

{دانشگاه فنی و حرفه‌ای - دانشکده فنی و کشاورزی واحد فسا}



تهیه و تنظیم:

علی کاظمی وکیل آبادی

سرفصل درس

الف - خطاهای متقارن

ب - مولفه های متقارن و خطاهای نامتقارن

منابع

- ۱- جزوه آموزشی دکتر سیدرضا ابراهیمی
- ۲- کتاب سیستم های قدرت الکتریکی - جلد دوم - تألیف: استاد احد کاظمی
- ۳- کتاب بررسی سیستم های قدرت - جلد دوم - تألیف: استاد هادی سعادت

فصل اول: خطاهای متقارن^۱

مطالعات خطا بخش مهمی از تجزیه و تحلیل سیستم های قدرت را تشکیل می دهد ، بررسی اختلالات بزرگ و ناگهانی ، تحت عنوان خطاهای^۲ در سیستم قدرت اهمیت ویژه ای دارد . مهمترین خطاها در سیستم قدرت شامل : « انواع اتصال کوتاه ها » و « قطع شدن ها » در خطوط انتقال یا تجهیزات سیستم می باشد . خطاهای ایجاد شده در سیستم های قدرت منجر به خطرات جانی و مالی فراوان شده و در بسیاری از موارد صدمات جبران ناپذیری را به همراه داشته است . خطا در یک سیستم ، قطعی برق ، کاهش ولتاژ مصرف کنندگان و آسیب زدن به تجهیزات شبکه مثل ترانسفورماتورها و ژنراتورها و دیگر تجهیزات و صدمه و حتی کشته شدن اپراتورهای خطوط انتقال و ... را در پی دارد. در چنین وضعیتی مطالعه بر روی شبکه در وضعیت خطا اهمیت ویژه ای پیدا می کند .

اطلاعات به دست آمده از انواع خطاها (نظیر اتصال کوتاه ها) در انتخاب و تنظیم رله ها بکار می روند .

عوامل پیدایش خطا در شبکه :

۱- صاعقه :

صاعقه یکی از اسرار آمیزترین پدیده های خلقت است ، که در عین زیبایی بسیار مخرب و در طول تاریخ زندگی انسان ، موجب ضرر و زیان مالی و جانی بسیاری شده است . صاعقه از تخلیه الکترواستاتیکی میان ابر و زمین بوجود می آید . درصد بالایی از اتصالاتی های خطوط انتقال نیرو از طریق برخورد صاعقه به خطوط انتقال ایجاد می شود .

اغلب عیب های خطوط انتقال 115 kV و بالاتر در اثر صاعقه به وجود می آید که منجر به تخلیه الکتریکی عایق ها می شود . ولتاژ بسیار زیاد بین هادی ها و دکل زمین شده ی نگهدارنده هادی باعث یونیدگی می شود که ایجاد مسیری به زمین برای بارهای القا شده توسط اصابت صاعقه می کند . هنگامی که مسیر یوینده شده به زمین برقرار شد ، امپدانس کم حاصل شده به زمین باعث عبور جریان قوی از هادی به زمین و از طریق زمین به نقطه خنثی ترانسفورماتور یا ژنراتور می شود و بدین ترتیب مدار کامل خواهد شد .

با باز کردن مدار شکن ها (بریکر) قسمت عیب دار خط از بقیه سیستم جدا می شود و در نتیجه منجر به قطع عبور جریان از مسیر یونیزه می گردد و اجازه می دهد که یون زدایی صورت پذیرد .

بعد از تقریباً ۲۰ سیکل (حدود 0.4 ثانیه) می توان مدار شکن را بدون تشکیل قوس مجدد الکتریکی وصل کرد . در بسیاری از موارد این وصل مجدد باعث ادامه فعالیت سیستم رفع خطا می شود . به عبارت دیگر اگر پس از قطع خط خطادار هوای یونیزه شده اطراف مقره پاک شود ، مجدداً مقره خاصیت عایقی پیدا کرده و می توان خط را برق دار کرد . اما در برخی از موارد وصل مجدد موفق نیست زیرا هنوز عیب برطرف نشده است .

عوامل دیگر پیدایش خطا در شبکه به قرار زیرند :

¹ Symmetrical Faults

² Faults

۲- سالم نبودن تجهیزات و لوازم سیستم

۳- شرایط جوی مثل باد، یخبندان، باران و... (اثر بر روی اتصالاتی مقرر شده و اتصال سیم ها به هم)

۴- برخورد وسایل نقلیه زمینی با دکل ها و برخورد وسایل نقلیه هوایی با هادی خطوط انتقال .

۵- برخورد پرندگان با هادی های خطوط انتقال و یا ورود حیوانات به پست ها و کلید خانه ها .

۶- سقوط درختان بر روی هادی خطوط انتقال .

۷- عوامل تصادفی و اتفاقات غیر قابل پیش بینی .

طی مطالعه ای که در سال ۱۹۹۳ توسط EPRI^۳ انجام شده است ، درصد خطاهای بوجود آمده توسط عوامل مختلف بصورت نمودار زیر برآورده شد :

در صد بالایی (نزدیک به ۴۰٪) از خطاها در مطالعه فوق تحت شرایط نامساعد جوی نظیر برف ، یخ و باد و باران بوجود آمدند. در شکل فوق دیده می شود که درصدی از خطاهای سیستم قدرت بر اثر نقص تجهیزات سیستم قدرت بوجود می آید . EPRI درصد خطای بوجود آمده توسط هر یک از اجزای شبکه را بصورت زیر بیان می کند :

درصد خطای ناشی از نقص تجهیز	تجهیز
۰/۰۳٪	ترانسفورماتورها
۰/۱۲۶٪	کلیدها
۰/۴۵٪	فیوزها
۱/۰۵٪	خازن ها و بانک های خازنی
۱/۵۰٪	ریکلوزرها
۲/۸۸٪	تنظیم کننده های ولتاژ
۱/۲۲٪ در هر ۱۰۰ مایل	هادی ها

^۳ Electric power Research Institute

خطاهایی که بر اثر عوامل فوق در سیستم های قدرت پدید می آیند، به ترتیب میزان شدت بصورت زیر طبقه بندی می شوند :

۱- اتصال کوتاه متقارن (سه فاز)^۴

این اتصال کوتاه بر اثر اتصال و برخورد سه فاز به یکدیگر بوجود می آید .

اتصال سه فاز ممکن است مستقیماً و با امپدانس صفر صورت گیرد . و یا از طریق سه امپدانس مساوی Z_f بین هر فاز و نقطه ی صفر به وقوع بپیوندد .

۲- اتصال کوتاه دو فاز :

این حالت خود به دو نوع اتصالی تقسیم می شود .

الف) اتصال دو فاز به یکدیگر^۵ (LL) : در این حالت دو فاز فقط به یکدیگر وصل می شوند .

ب) اتصال دو فاز با هم و به زمین^۶ (DLG) : در این حالت دو فاز همزمان به زمین متصل می گردند .

۳- اتصال کوتاه تک فاز به زمین^۷ (SLG) :

این اتصال ممکن است در اثر برخورد صاعقه یا هدایت عایقی (شکست) و ایجاد جرقه روی مقره ها و یا در اثر یکی از عوامل ذکر شده در صفحات قبل بوجود آید . بطوریکه یکی از فازها از طریق بدنه دکل به زمین وصل شود .

شکل زیر اتصال کوتاه یک فاز خط انتقال به بونه دکل فشار قوی را نشان می دهد .

۴- پاره شدن (قطع) هادی های خطوط انتقال^۸ :

در این نوع از خطا یک یا دو فاز از خط انتقال قطع می گردد و جریان آن به صفر می رسد .

بیشترین اتصال کوتاه ها از نوع تک فاز به زمین بوده و بیش از ۷۵٪ اتصال کوتاه های شبکه را تشکیل می دهند . کمترین اتصال کوتاه از نوع متقارن (سه فاز) می باشد و کمتر از ۵٪ اتصال کوتاه های شبکه از این نوع می باشند . جدول زیر احتمال وقوع هر یک از اتصال کوتاه را بر حسب درصد بیان می کند :

بیش از ۷۵٪	اتصال کوتاه تک فاز به زمین (SLG)
حدود ۲۰٪	اتصال کوتاه دو فاز (LL) و (DLG)
کمتر از ۵٪	اتصال کوتاه سه فاز (متقارن)

^۴ symmetrical (Three phase) short circuit

^۵ Line – to – Line short circuit

^۶ Double –Line – to ground

^۷ Single Line to ground

^۸ Open Conductor fault

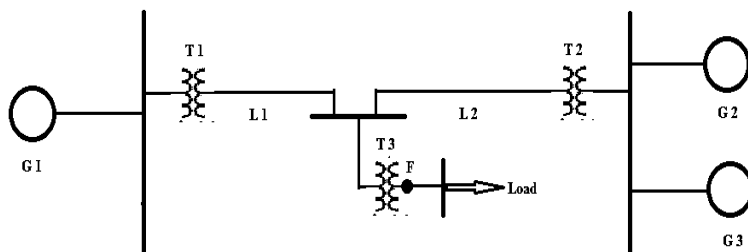
تقسیم بندی خطاها به دو دسته متقارن و نامتقارن :

هنگامی که یک اتصال کوتاه سه فاز در سیستم قدرت بوقوع می پیوندد ، تقارن سیستم قدرت بهم نمی خورد . به عبارت دیگر هر سه فاز در وضعیت مشابهی اتصال کوتاه را حس می کنند . به همین دلیل به اتصال کوتاه سه فاز خطا (اتصال کوتاه) متقارن^۹ می گویند .

هنگامی که سه نوع دیگر خطا (اتصال کوتاه تک فاز به زمین ، اتصال کوتاه دو فاز ، قطع هادی های خطوط انتقال) در یک سیستم سه فاز بوقوع می پیوندد ، سیستم سه فاز تقارن خود را از دست می دهد . به عنوان مثال هنگامی که یک اتصال کوتاه SLG در یک فاز از خط انتقال بوقوع می پیوندد وضعیت فاز اتصال شده با دو فاز دیگر متفاوت خواهد بود و سیستم سه ، پس از خطا تقارن نخواهد داشت به همین دلیل به این خطاها ، خطای نامتقارن^{۱۰} گفته می شود .

نکته ۱) ظرفیت انتقال قدرت یک خط انتقال در اثر اتصال کوتاه متقارن به صفر می رسد . در حالیکه در اتصال کوتاه نامتقارن ، قسمتی از قدرت قبلی خط منتقل می گردد .

نکته ۲) اتصال کوتاه در شبکه علاوه بر این که ظرفیت انتقال قدرت را کاهش می دهد . جریان های زیاد اتصال کوتاه می توانند به وسایل و تجهیزات سیستم آسیب بزنند و لذا محل های اتصال کوتاه شده در اسرع وقت باید توسط رله ها و بریکرها از سیستم قدرت جدا شوند . بنابراین مطالعه سیستم قدرت در شرایط اتصال کوتاه برای حفاظت سیستم و تعیین مقادیر نامی کلیدهای قدرت و رله ها کاملاً ضروری می باشد . به عنوان مثال اگر در شبکه شکل زیر در نقطه F اتصال کوتاهی بوقوع پیوندد و خط اتصال کوتاه شده ، توسط مدار شکن^{۱۱} از سیستم جدا نشود ، ترانسفورماتور و ژنراتور و دیگر تجهیزاتی که در مسیر عبور جریان زیاد اتصال کوتاه قرار میگیرند ، آسیب می بینند .

⁹ Symmetrical tault¹⁰ unsymmetrical fault¹¹ breaker

خطاهای موقتی و خطاهای ماندگار :

بسیاری از خطاهای و اتصال کوتاه های یک شبکه ، موقتی بوده و بخودی خود رفع می شوند (مثل برخورد لحظه ای دو سیم به یکدیگر در اثر باد) و در مقابل برخی از خطاهای شبکه ، ماندگار و یا دائمی می باشند (افتادن درخت بر روی یک خط انتقال) و برای رفع آنها باید عامل بوجود آورنده خطا را از میان برداشت و یا سیستم را اصلاح کرد .

نمونه هایی از خطاهای موقتی ایجاد شده در شبکه :

- یونیزه شدن هوای اطراف مقره و شکست عایقی هوا
- برخورد لحظه ای دو سیم (دو فاز) به یکدیگر در اثر باد
- برخورد پرندگان با هادی خطوط انتقال و...

نمونه ای از خطاهای ماندگار ایجاد شده در شبکه :

- شکسته شدن نگهدارنده مقره ها در اثر وزن یخ
- خسارت دائمی به دکل
- نقص در برقگیر
- افتادن درخت بر روی یک خط انتقال و...

در عمل در بعضی از نقاط سیستم قدرت ، از کلیدهای وصل مجدد^۲ (ریکلوزر) استفاده می شود . این کلیدها پس از وقوع اتصال کوتاه یک یا دوبار و یا بیشتر وصل می شوند تا از برطرف شدن اتصال کوتاه مطمئن شوند . اگر پس از یک یا دو یا چند بار وصل مجدد هنوز اتصال کوتاه برقرار باشد ، کلید به طور دائمی باز خواهد ماند و نشان می دهد که اتصال کوتاه از نوع ماندگار می باشد . زمان کل این عمل ممکن است یک ثانیه به طول بینجامد .

ژنراتورهای سنکرون

ژنراتورهای سنکرون^{۱۲} (آلترناتورها) ماشین‌های سنکرونی هستند که برای تبدیل توان مکانیکی به توان الکتریکی ac به کار می‌روند. ژنراتورهای سنکرون نیروگاه‌ها، که مهمترین جزء یک شبکه قدرت محسوب می‌شوند. به همین دلیل پیش از اینکه به بررسی اتصال کوتاه سیستم‌های قدرت بپردازیم، باید ساختمان و عملکرد ژنراتور سنکرون را شناخته و بر اساس آن عکس‌العمل ژنراتور را نسبت به خطاهای مختلف شبکه مورد بررسی قرار دهیم.

ساختمان ژنراتور سنکرون :

در ژنراتور سنکرون یک جریان DC به سیم پیچی رتور اعمال می‌شود. که میدان مغناطیسی رتور را تولید می‌کند.

رتور ژنراتور نیز توسط یک محرک اولیه به گردش در می‌آید. به این ترتیب یک میدان مغناطیسی دوار درون ماشین ایجاد می‌شود. این میدان مغناطیسی دوار در سیم پیچی‌های سه فازی است که درون شیارهای استاتور جاسازی شده و در طول محیط آن پخش و توزیع گردیده اند.

قطب‌های مغناطیسی رتور می‌توانند ساختمان برجسته یا صاف داشته باشند. بر همین اساس دو نوع ژنراتور سنکرون خواهیم داشت :

(۱) ژنراتورهای رتور استوانه ای :

این رتورها به صورت یک استوانه صاف که معمولاً دارای قطر کمتر و طول بیشتر و تعداد قطب‌های کمتری می‌باشند ساخته می‌شوند و این ژنراتورها بیشتر به صورت افقی نصب می‌شوند. در نیروگاه‌های بخاری و گازی که سرعت چرخش توربین خیلی زیاد از این نوع ژنراتورها استفاده می‌شود که اکثراً به صورت دو قطب ساخته می‌شوند.

نیروگاه‌های بخاری یکی از مهم‌ترین نیروگاه‌های حرارتی می‌باشد که در اکثر کشورها از جمله ایران سهم بسیار زیادی را در تولید انرژی الکتریکی برعهده دارند. به طوری که سهم تولید این نیروگاه حدود ۴۷/۳٪ کل تولید انرژی کشورمان می‌باشد. این نیروگاه‌ها از ژنراتورهای رتور استوانه ای برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌کنند. در ایران نیروگاه‌های رامین اهواز، شهید سلیمی نکهه، شهید منتظری اصفهان، شازند اراک و شهید رجایی قزوین نمونه نیروگاه‌های بخاری هستند که ژنراتور آنها رتور استوانه ای می‌باشد.

(۲) ژنراتورهای قطبی برجسته : در سرعت‌های چرخش پائین ژنراتورهای رتور استوانه ای قابلیت خوبی ندارند و خروجی آنها دارای اعوجاج می‌باشد و در حالت‌های گذرا حد پایداری کمتری دارند به همین دلیل در سرعت‌های چرخش پائین از رتورهای قطب برجسته استفاده می‌شود که ایرادهای ذکر شده را جبران می‌نماید. ساختمان این رتورها به صورت قطب‌های تکه ای و برجسته که بین قطب‌ها فاصله هوایی وجود دارد ساخته می‌شود.

¹² synchronouse Generator

شود و عموماً دارای قطر بیشتر به دلیل تعداد قطب زیاد و طول کمتر ساخته می شود و به صورت عمودی نصب می شود .

رتورهای قطب برجسته معمولاً برای ماشین های چهار قطبی یا بیشتر بکار می روند . شکل زیر رتور یک ژاتور سنکرون قطب برجسته شش قطبی را نشان می دهد .

در نیروگاه های آبی به دلیل سرعت کم توربین از ژنراتور های قطب برجسته استفاده می شود . نیروگاه های آبی در حدود ۵٪ ۹ از انرژی کل کشور را تامین می کنند . نیروگاه های آبی کارون ۱، کارون ۳، کارون ۴، مسجد سلیمان ، دز و کرخه دارای ژنراتور با رتور قطب برجسته می باشند.

سرعت چرخش ژنراتور سنکرون :

ژنراتور سنکرون طبق تعریف « سنکرون » یا « همزمانند » به این معنی که رقم فرکانس الکتریکی تولید شده با سرعت چرخش مکانیکی ژنراتور همزمان است.

رتور ژنراتور سنکرون یک الکترومغناطیس است که به آن جریان dc اعمال می شود . میدان مغناطیسی رتور به همواره با چرخش رتور می چرخد . پس بین سرعت چرخش میدان مغناطیسی ماشین و فرکانس الکتریکی استاتور رابطه ای به صورت زیر وجود دارد .

$$F = \frac{np}{120}$$

فرکانس برق ایران ۵۰ HZ است بنابراین یک ژنراتور دو قطبی مثل ژنراتور نیروگاه نکا با سرعت ۳۰۰۰ rpm می گردد .

مدار معادل ژنراتور سنکرون استوانه ای :

ولتاژ E_A ولتاژ داخلی تولید شده در یک فاز ژنراتور سنکرون است . اما این ولتاژ دقیقاً آن مقداری که در پایان ژنراتور ظاهر می شود نیست . حال این پرسش مطرح می شود که « چرا ولتاژ خروجی E_A با V_θ برابر نیست ؟ » و « چه رابطه ای بین این دو ولتاژ وجود دارد ؟ »

تفاوت بین E_A و V_θ در اثر چند عامل است :

۱- اعوجاجی که به علت جریان استاتور در میدان مغناطیسی فاصله هوایی ایجاد شده و عکس العمل

آرمیچر نامیده می شود .

۲- خود القا کنائی پیچک های آرمیچر

۳- مقاومت پیچک های آرمیچر

۴- اثر شکل قطب برجسته رتور

در ابتدا رتور را استوانه ای فرض کرده و اثر عامل چهارم را در نظر نمی گیریم و در این حالت با در نظر گرفتن ۳ عامل اول مدار معادلی را برای ماشین پیشنهاد می کنیم .

مهمترین اثری که باعث برابر نبودن ولتاژ ترمینال ماشین با ولتاژ داخلی آن می شود ، عکس العمل آرمیچر است . هنگامی که رتور ژنراتور سنکرون می چرخد ، در سیم پیچی های استاتور آن ولتاژ E_A القا می شود . اگر باری به پایانه های ژنراتور متصل باشد ، جریانی از آن می گذرد . اما این جریان های سه فاز در ماشین ، میدان مغناطیسی خودشان را تولید می کنند . این میدان مغناطیسی استاتور شکل میدان مغناطیسی اصلی رتور را تغییر داده و در نتیجه ولتاژ فاز را نیز تغییر می دهد .

این اثر را عکس العمل آرمیچر^{۱۳} می نامند زیرا جریان آرمیچر (استاتور) بر میدان مغناطیسی ای که عامل بوجود آورنده اش است ، تاثیر می گذارد .

برای درک عکس العمل آرمیچر به شکل ۱۱ توجه کنید . شکل ۱۱ یک رتور دو قطبی را نشان میدهد که درون یک استاتور سه فاز می چرخد . هیچ باری به استاتور وصل نیست . میدان مغناطیسی رتور B_R ولتاژ داخلی E_A را تولید می کند . مقدار ماکزیمم این ولتاژ در جهت B_R است . با توجه به جهت میدان و جهت گردش رتور می توان گفت که ولتاژ هادی بالایی مثبت و به طرف بیرون و ولتاژهای پایین منفی و به طرف داخل است . اگر ژنراتور بار نداشته باشد ، از آرمیچر جریانی نمی گذرد و E_A با V_ϕ برابر است .

حال فرض می کنیم که ژنراتور به یک بار پس فاز متصل است . چون بار پس فاز است ، ماکزیمم جریان در زاویه ای بعد از ماکزیمم ولتاژ اتفاق می افتد . این مساله در شکل زیر نشان داده شده است .

جریان سیم پیچی های استاتور میدان مغناطیسی خودش را تولید می کند . این میدان مغناطیسی استاتور استاتور B_s نام دارد و جهت آن با استفاده از قاعده دست راست بدست می آید و در شکل ۱۳ نشان داده شده

¹-armature reaction

است. میدان مغناطیسی استاتور B_s ولتاژ خودش را در استاتور القا می کند، این ولتاژ را با E_{stat} نشان می‌دهیم.

با توجه به دو ولتاژی که در سیم پیچی های استاتور وجود دارد، ولتاژ کل هر فاز با مجموع ولتاژ داخلی E_A و ولتاژ عکس العمل آرمیچر E_{stat} برابر است.

$$V = E_A + E_{stat}$$

میدان مغناطیسی برآیند B_{net} با مجموع میدان مغناطیسی رتور و استاتور برابر است:

$$B_{net} = B_R + B_S$$

چون زاویه های E_A و B_R یکسان اند و زاویه های E_{stat} و B_S نیز برابرند، میدان مغناطیسی برآیند B_{net} بر ولتاژ برآیند V_θ منطبق است. این ولتاژها و جریان ها در شکل ۱۴ نشان داده شده اند.

اثرات عکس العمل آرمیچر بر ولتاژ فاز را چگونه می توان مدل کرد ؟

اولاً: ولتاژ E_{stat} در زاویه ای قرار دارد که ۹۰ درجه عقب تر از صفحه جریان ماکزیمم I_A است.

ثانیاً: ولتاژ E_{stat} مستقیماً با جریان I_A متناسب است. اگر X ثابت تناسب باشد، آنگاه ولتاژ عکس العمل آرمیچر را می توان با رابطه زیر بیان کرد:

$$E_{stat} = JxI_A$$

بدین ترتیب ولتاژ فاز برابر است با:

$$V_\theta = E_A - JxI_A$$

این معادله همان معادله ای است که ولتاژ عکس العمل آرمیچر را توصیف می کند. بنابراین ولتاژ عکس العمل آرمیچر را می توان به صورت یک ساف سری شده با ولتاژ داخلی مدار مدل کرد.

علاوه بر اثرات عکس العمل آرمیچر، پیچک های استاتور نیز خود یک خود القایی و یک مقاومت دارند. اگر خود القایی را L_A (و راکتانس نظیر آن را X_A) و مقاومت استاتور را R_A بنامیم، تفاوت کل بین E_A و V_θ با رابطه زیر داده می شود.

$$V_\theta = E_A - JxI_A - Jx_A I_A - R_A I_A$$

اثرات عکس العمل آرمیچر و خود القایی ماشین با راکتانس هایی نمایش داده می شوند. معمولاً این دو راکتانس را در یک راکتانس ترکیب می کنند و آن را راکتانس سنکرون ماشین می نامند.

بنابراین رابطه نهایی توصیف کننده V_θ به صورت زیر در می آید.

$$V_\theta = E_A - Jx_S I_A - R_A I_A$$

اینک می توان مدار معادل یک ژنراتور سنکرون سه فاز را رسم کرد. مدار معادل کامل چنین ژنراتوری در شکل زیر نشان داده شده است.

این شکل یک منبع توان DC را نشان می‌دهد که مدار میدان تور را تغذیه می‌کند. مدار میدان رتور با یک سلف و یک مقاومت متغیر سری مدل شده است. مقاومت سری قابل تنظیم R_{adj} جریان میدان را تنظیم می‌کند. ولتاژها و جریان‌های سه فاز از لحاظ اندازه کاملاً با هم برابرند ولی 120° درجه با یکدیگر تفاوت دارند. این سه فاز مطابق شکل ۱۶ می‌توانند به دو صورت Y یا Δ به هم اتصال داده شوند.

نمودار فازوی یک ژنراتور سنکرون :

چون ولتاژ ژنراتور سنکرون ، ولتاژهای ac هستند ، معمولاً آنها را بصورت فازور بیان می کنند . شکل ۱۷ نمودار فازوری ژنراتور سنکرون را در ضریب توان واحد ، ضریب توان پیش فاز و ضریب توان پس فاز نشان می دهد .

از نمودارهای فوق می توان فهمید که ، اگر بخواهیم ولتاژ ترمینال ثابتی داشته باشیم ، بارهای پس فاز نسبت به بار پیش فاز به ولتاژ داخلی بیشتری نیاز دارد . از طرف دیگر به ازای یک جریان تحریک و جریان بار معین ، ولتاژ پایانه ای برای بارهای پس فاز کمتر و برای بارهای پیش فاز بیشتر است .

یافتن مدار معادل ژنراتور سنکرون قطب - برجسته :

اگر رتور ماشین سنکرون استوانه ای نباشد و برجسته باشد ، دیگر نمی توان از روابط و مدار معادل های ماشین سنکرون قطب برجسته استفاده کرد . در این حالت باید علاوه بر موارد فوق گشتاور رلوکتانسی را نیز در گردش ماشین در نظر گرفت . شکل زیر نمایش ساده های از این وضعیت را نشان می دهد .

همانند وضعیتی که در فرضیه رتور استوانه ای داشتیم ، در مدار معادل ژنراتور سنکرون چهار عنصر دخیل اند :

۱-ولتاژ تولید شده ی داخلی ژنراتور E_A

۲-عکس العمل آرمیچر ژنراتور سنکرون

۳-خود القایی سیم پیچی استاتور

۴-مقاومت سیم پیچی استاتور

اولین ، سومین و چهارمین عنصر در فرضیه برجسته بودن قطب ژنراتورهای سنکرون تغییری نمی کنند ، اما اثر عکس العمل آرمیچر را باید به گونه ای اصلاح کرد که آسان تر بودن ایجاد شار در بعضی از جهت ها نسبت به جهت های دیگر در آن منعکس شود .

این اصلاح اثر عکس العمل آرمیچر به طریقی که در زیر توضیح می دهیم انجام می شود . شکل ۱۸ یک رتور قطب - برجسته دو قطبی را نشان می دهد که درون استاتور دو - قطبی در جهت پادساعتگرد می چرخد . شار رتور این ژنراتور B_R نام دارد و جهت آن به سوی بالا است .

شکل ۱۹-اثر عکس العمل آرمیچر در ژنراتور سنکرون قطب - برجسته . (الف) میدان مغناطیسی رتور ولتاژی در استاتور القا می کند که ماکزیمم آن در سیم هایی است که درست مقابل رخ قطب ها قرار می گیرند . (ب) اگر باری پسفاز به ژنراتور وصل شود . جریانی از استاتور می گذرد که ماکزیمم آن در زاویه ای قبل از E_A رخ می دهد . (ج) این جریان I_A استاتور ، یک نیروی محرکه مغناطیسی در استاتور ماشین تولید می کند .

با استفاده از رابطه ی ولتاژ القا شده در یک هادی متحرک واقع در میدان مغناطیسی ،

$$E_{ind} = (V \times B) \cdot l$$

ولتاژ هادی ها در قسمت بالایی استاتور به سمت خارج صفحه و ولتاژ هادی های قسمت پایینی استاتور به سمت داخل صفحه است . صفحه ی ماکزیمم ولتاژ القا شده در هر زمان درست زیر قطب رتور قرار دارد .

حال اگر یک بار پسفاز به پایانه های این ژنراتور متصل شود ، جریانی می گذرد که ماکزیمم آن از ماکزیمم ولتاژ عقب تر است ، این جریان در شکل ۱۸- ب نشان داده شده است .

جریان استاتور یک نیروی محرکه مغناطیسی تولید می کند که 90° عقب تر از صفحه ی ماکزیمم جریان استاتور قرار دارد ، این مطلب در شکل ۱۸- ج نشان داده شده است .

در فرضیه ی استوانه ای بودن ، این نیروی محرکه مغناطیسی ، میدان مغناطیسی B_s استاتور را تولید می کند که با نیروی محرکه مغناطیسی استاتور هم امتداد است . اما ، در واقع تولید میدان مغناطیسی در امتداد رتور

ساده تر از تولید آن در امتداد عمود بر روتور است. بنابراین، نیروی محرکه مغناطیسی استاتور را به دو مؤلفه موازی با محور روتور و عمود بر محور روتور تقسیم می‌کنیم. هر کدام از این نیروهای محرکه مغناطیسی یک میدان مغناطیسی ایجاد می‌کنند، اما مقدار شاری که به ازادی هر آمپر دور در امتداد محور ایجاد می‌شود بیشتر از آن چیزی است که در امتداد عمود بر محور (امتداد عرضی) ایجاد می‌شود.

میدان مغناطیسی حاصل در استاتور در شکل ۱۸- نشان داده شده، و با میدانی که با فرضیه ی استوانه ای بودن پیش بینی می‌شود مقایسه شده است.

شکل ۱۹(د) نیروی محرکه مغناطیسی استاتور شار B_s را در استاتور تولید می‌کند. اما، مولفه محور طولی نیروی محرکه ی مغناطیسی، به ازای هر آمپر دور، شار بیشتری نسبت به مولفه ی محور عرضی استاتور ماشین ایجاد می‌کنند.

هر کدام از مؤلفه های میدان مغناطیسی ناشی از عکس العمل آرمیچر ولتاژ مربوط به خودش را درسیم پیچی ایتاتور ایجاد می‌کند. این ولتاژهای عکس العمل آرمیچر در شکل ۱۸- هـ نشان داده شده اند.

به این ترتیب ولتاژ کل استاتور برابر است با

$$V_{\phi} = E_A + E_d + E_q$$

که در آن E_d مولفه محور طولی ولتاژ عکس العمل آرمیچر و E_q مولفه محور عرضی ولتاژ عکس العمل آرمیچر است.

شکل ۲۰- ولتاژ فاز ژنراتور درست برابر مجموع ولتاژ تولید شده ی داخلی و ولتاژهای عکس العمل آرمیچر آن است.

همانند فرضیه استوانه بودن روتور، هر یک از ولتاژ عکس العمل آرمیچر مستقیماً با جریان استاتور متناسب است و نسبت به جریان استاتور 90° تاخیر دارد. بنابراین هر یک از ولتاژهای عکس العمل آرمیچر را می‌توان با یکی از روابط زیر مدل کرد.

$$E_d = -jX_d I_d$$

$$E_q = -jX_q I_q$$

و کل ولتاژ استاتور برابر است با

$$V_\phi = E_A - jX_d I_d - jX_q I_q$$

اینک باید مقاومت و راکتانس خودی آرمیچر را در نظر گرفت. چون راکتانس خودی آرمیچر X_A مستقل از زاویه δ روتور است، معمولاً آن را به راکتانس‌های طولی و عرضی عکس العمل آرمیچر اضافه می‌کنند تا راکتانس سنکرون طولی و راکتانس سنکرون عرضی ژنراتور به دست می‌آید:

$$X_d = x_d + X_A$$

$$X_q = x_q + X_A$$

افت ولتاژ مقاومت آرمیچر چیزی جز حاصل ضرب مقاومت آرمیچر در جریان آرمیچر I_A نیست.

بنابراین، رابطه‌ی نهایی ولتاژ فاز ژنراتور سنکرون قطب - برجسته به صورت زیر است:

$$v_\phi = E_A - jX_d I_d - jX_q I_q - R_A I_A$$

و نمودار فیروزی حاصل در شکل ۲۰ نشان داده شده است. توجه کنید که در این نمودار باید جریان آرمیچر به مولفه‌هایی در امتداد E_A و عمود بر E_A تجزیه شود. اما زاویه E_A و $\theta + \delta$ است که معمولاً قبل از رسم نمودار معلوم نیست. اغلب تنها زاویه θ را از پیش می‌دانیم.

می توان بدون دانستن زاویه δ نمودار فیروزی را رسم کرد ، نحوه ی ترسیم در شکل ۲۱ نشان داده شده است . خطوط توپر شکل ۲۱ عیناً مانند خطوطی هستند که در شکل ۲۰ نشان داده شده است ، اما خطوط بریده نمودار فیروزی را با این فرض نشان می دهند که ماشین روتور استوانه ای و راکتاس سنکرون X_d باشد .

شکل ۲۲- رسم نمودار فیروزی بدون دانستن مقدار $E''_A \delta$ در همان امتداد زاویه ای E''_A را منحصرأ با استفاده از اطلاعات پایانه ای ژنراتور می توان تعیین کرد . بنابراین زاویه δ را می توان یافت . و جریان را به مؤلفه های d و q تجزیه کرد .

زاویه δ ولتاژ E_A را می توان با استفاده از اطلاعات معلوم در پایانه های ژنراتور یافت . توجه کنید که فیروز E''_A ، که به وسیله رابطه زیر بیان می شود .

$$E''_A = V_\phi + R_A I_A + jX_q I_A$$

با ولتاژ داخلی E_A در یک امتداد قرار دارد . چون E''_A توسط جریان پایانه ای ژنراتور تعیین می شود ، با دانستن جریان آرمیچر می توان زاویه δ را معلوم کرد . وقتی δ معلوم شد ، جریان آرمیچر را می توان به دو مؤلفه طولی و عرضی تقسیم کرد و ولتاژ تولید شده ی داخلی را به دست آورد .

بررسی حالت گذاری مدار RL سری

مدار معادل ژنراتورهای سنکرون و شبکه در حالت تک فاز (مدار معادل تک فاز) معادل یک مدار RL سری می باشد که ولتاژ سینوسی $V(t) = V_{max} \sin(wt + a)$ به آن اعمال شده است، قبل از بررسی اتصال کوتاه سه فاز متقارن در ژنراتورهای سنکرون، لازم است اتصال کوتاه در مدار RL سری را در بررسی کنیم. به همین منظور مدار شکل ۲۳ را در نظر می گیریم.

در $t=0$ کلید بسته می شود و جریان i در مدار برقرار می گردد. برای تعیین i با نوشتن kvl در مدار تک حلقه فوق معادل دیفرانسیل مدار را بصورت زیر بدست می آوریم.

$$V_{max} \sin(wt + a) = Ri + L \frac{di}{dt}$$

معادله فوق یک معادله دیفرانسیل خطی مرتبه اول بوده و با حل آن جواب معادله بصورت رابطه زیر بدست می آید.

$$I(t) = \frac{V_{max}}{Z} \left[\sin(wt + a - \theta) - e^{-\frac{R}{L}t} \sin(a - \theta) \right]$$

که در آن:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{WL}{R}$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (WL)^2}$$

اولین جمله معادله $i(t)$ بصورت سینوسی با زمان تغییر می کند. جمله دوم غیر تناوبی است و بصورت نمایی با ثابت زمانی $\frac{L}{R}$ کاهش می یابد. به این جمله غیر تناوبی، مؤلفه dc جریان می گوئیم. این عبارت مؤلفه گذرای جریان نیز نامیده می شود. این جریان به صورت نمایی و با ثابت زمانی $\frac{L}{R}$ کاهش می یابد.

جمله سینوسی را به عنوان مقدار ماندگار جریان در مدار RL برای ولتاژ اعمالی داده شده در نظر می گیریم. چنانچه مقدار جمله حالت ماندگار در لحظه $t=0$ برابر صفر نباشد، در اینصورت مؤلفه DC برای برآورده شدن شرط جریان صفر در بحظه وصل کلید، در جواب ظاهر می شود.

توجه شود که اگر مدار در لحظه ای از موج ولتاژ وصل شود که $\alpha - \theta = 0$ یا $\alpha - \theta = \pi$ ، باشد در این صورت جمله dc وجود نخواهد داشت. شکل ۲۴ نشان دهنده تغییرات جریان با زمان برطبق معادله $i(t)$ ، هنگامی که $\alpha - \theta = 0$ باشد، است.

اگر کلید در لحظه های از موج ولتاژ وصل شود که $\alpha - \theta = -\frac{\pi}{\gamma}$ باشد، در این صورت مولفه DC دارای بیشترین مقدار اولیه خود، که برابر با مقدار حداکثر مولفه سینوسی است، خواهد بود. شکل ۲۵ جریان را بر حسب زمان، هنگامی که $\alpha - \theta = -\frac{\pi}{\gamma}$ باشد، نشان می دهد.

در این حالت معادله جریان به صورت زیر خواهد بود:

$$i(t) = \frac{v_{max}}{z} \left[\sin \left(\omega x - \frac{\pi}{\gamma} \right) - e^{-\frac{R}{L}t} \right]$$

مولفه dc می تواند هر مقدار از صفر تا $\frac{v_{max}}{|z|}$ ، بسته به مقدار لحظه ای ولتاژ، هنگامی که مدار وصل می شود و بسته به ضریب توان مدار، داشته باشد. در لحظه اعمال ولتاژ مولفه dc و حالت ماندگار دارای اندازه برابر ولی علامت های مخالف هستند تا که این مقدار جریان صفر را برآورده کنند. در خطوط انتقال بسته به محل (موقعیت) خطا و پیکربندی خطوط انتقال مولفه های dc متفاوتی خواهیم داشت. و رله با خطاهای در مکان های مختلف، جریان های dc متفاوتی را در ورودی خود می بیند.

مثال ۱ :

در مدار RL شکل زیر اگر $R=0.125$ اهم و $L=10\text{mH}$ و منبع ولتاژ بصورت $V(t) = 151 \sin (377t+\alpha)$

باشد.

الف) مقدار زاویه α چقدر باشد تا در لحظه بستن کلید هیچ مولفه مولفه DC در جریان مشاهده نشود؟ در این حالت معادله جریان را بنویسید.

ب) مقدار زاویه α چقدر باشد تا در لحظه بستن کلید حداکثر مولفه DC در جریان مشاهده شود؟ در این حالت معادله جریان را بنویسید.

اتصال کوتاه متقارن در ماشین سنکرون بی باری :

سخت ترین حالت گذرایی که ممکن است در یک ژنراتور سن کرون روی دهد ، حالتی است که سه پایانه ژنراتور به طور همزمان و ناگهانی اتصال کوتاه شوند .

اگر در ترمینال های خروجی یک ژنراتورهای سنکرون بی بار ، اتصال کوتاه متقارن (سه فاز) به وقوع پیوندد با قرار دادن یک اسیلو گرام جریان در یکی از فازهای ژنراتور می توان تغییرات جریان اتصال کوتاه را نسبت به زمان مورد بررسی قرار داد .

قبل از بروز اتصالی ، در ژنراتور تنها ولتاژها و جریان های ac وجود دارند . اما پس از بروز اتصالی هم مولفه ac وجود دارد هم مولفه dc . چون در لحظه بروز اتصالی مقدار لحظه ای جریان فاز های مختلف متفاوت است ، اندازه مولفه DC جریان فازها متفاوت خواهد بود .

شکل ۲۷ جریان اتصال کوتاه متقارن (سه فاز) در پایانه های یک ژنراتور سنکرون بی بار را هنگامی که مولفه DC جریان حذف شده باشد ، نشان می دهد .

این جریان را می توان تقریباً به سه دوره تقسیم کرد .

- دوره زیر گذرا^{۱۴}: در اولین تناوب یا چند تناوب اول ، بعد از بروز اتصالی ، جریان ac بسیار بزرگ است و خیلی سریع افت می کند . این دوره از زمان را دوره زیر گذرا می گویند .
- دوره گذرا^{۱۵}: پس از دوره زیر گذرا ، جریان به کم شدن ادامه می دهد اما سرعت افت آن کمتر است ، تا اینکه در نهایت به حالت پایدار برسد . این مدت را دوره گذرا می نامند .
- دوره حالت ماندگار (پایدار)^{۱۶}: جریان پس از عبور از دو دوره فوق به شکل موج سینوسی پایدار می رسد و این دوره که تا زمان برقراری اتصال کوتاه وجود دارد ، دوره ماندگار نامیده می شود .

با دانستن مباحث فوق دو سوال مهم در ذهن مطرح می شود و آن هم این است که :

اولاً: چرا جریان هر فاز ژنراتور سنکرون در لحظات اولیه پس از وقوع اتصالی بسیار زیاد بوده و پس از گذشت زمان ، مقدار آن کاهش می یابد ؟

ثانیاً: پیش از این گفتیم که با اتصال کوتاه سه فاز در پایانه ژنراتور های سنکرون ، مدار معادل تک فاز ژنراتور به صورت یک مدار RL سری اتصال کوتاه شده در می آید . اما با اینکه مدار ژنراتور سنکرون همانند مدار RL است ، شکل موج جریان یک مدار RL در حالتی که مولفه dc نداشته باشیم به صورت شکل ۲۴ بوده و شکل موج جریان اتصالی ژنراتور به صورت شکل ۲۷ می باشد . علت تفاوت این دو شکل موج چیست ؟

پاسخ : جریان اتصال کوتاه در چند سیکل اولیه ۰ دو یا سه سیکل (خیلی بیشتر از سیکل های بعدی است و علت آن این است که شار مغناطیسی در فاصله ی هوایی ماشین در لحظه ی وقوع اتصال کوتاه بسیار زیاد است و پس از عبور جریان اتصال کوتاه از آرمیچر ف مدت زمانی طول می کشد که شار مغناطیسی فاصله ی هوایی کم شود و عکس العمل آرمیچر به وجود می آید . با کاهش شار فاصله هوایی ، ولتاژ القایی در هر یک از سیم پیچ های سه فاز کاهش یافته و در مدار تک فاز تک حلقه ذکر شده ، با کاهش ولتاژ جریان آرمیچر نیز کاهش می یابد. بنابراین در سیکل های بعدی جریان کمتری خواهیم داشت .

در یک ماشین سنکرون اتصال کوتاه شده ، از آنجا که مقاومت اهمی آرمیچر در مقابل راکتانس القایی ماشین بسیار کم است ، می توان از آن صرف نظر نمود و مدار معادل ماشین سنکرون را مطابق شکل ۲۸ برای یک فاز رسم کرد .

¹⁴ subtransient period

¹⁵ transient period

¹⁶ steady – state period

بنابراین جریان اتصال کوتاه مطابق شکل زیر تقریباً ۹۰ درجه از ولتاژ بی باری E_A عقب تر است . (برای درک بهتر این نمودار به نمودار فازوری ژنراتورهای سنکرون قطب برجسته (شکل ۲۱) توجه شود).

از طرفی طبق نمودار فازروی و رابطه گفته شده برای ژنراتورهای سنکرون قطب برجسته (صفحه ۱۳) داریم :

$$E_A = V + R_a I_a + jX_a I_a + jX_q I_q$$

که E_A ولتاژ داخلی ژنراتور می باشد .

در شرایط اتصال کوتاه با قرار دادن $V=0$, $R_a=0$, $I_q=0$, $I_d=1$ در رابطه فوق داریم :

$$E_A = jX_d I$$

و این رابطه نشان می دهد که در محاسبات اتصال کوتاه سیستم های قدرت باید از راکتانس های محور مستقیم (X_d) استفاده کرد و در این محاسبات از راکتانس X_q استفاده نمی شود .

جریان های ماندگار ، گذرا و زیر گذاری اتصال کوتاه :

پیش از این گفتیم که شکل موج جریان اتصال کوتاه یک ژنراتور سنکرون بصورت شکل زیر می باشد .

در شکل ۳۰، oa مقدار ماکزیمم « جریان ماندگار اتصال کوتاه^{۱۷} » می باشد. جریان ماندگار اتصال کوتاه، همان جریان I در معادله زیر است که پیش از این ذکر شد.

$$E_A = jX_d I$$

بنابراین، مقدار موثر جریان اتصال کوتاه ماندگار از رابطه زیر بدست می آید:

$$|I'| = \frac{oa}{\sqrt{2}} = \frac{|E_A|}{X'_d}$$

راکتانس محور مستقیم ماشین سنکرون (X_d) را می توان از رابطه فوق بدست آورد.

اگر از چند سیکل اول که در آن دامنه جریان به شدت کاهش می یابد، صرفنظر کنیم، طول ob نشان دهنده مقدار ماکزیمم « جریان اتصال کوتاه گذرا^{۱۸} » می باشد. جریان اتصال کوتاه گذرا را با I' نشان می دهند. در این صورت اگر E_A را ثابت فرض کنیم، باید راکتانس جدیدی را برای ماشین تعریف کنیم که به « راکتانس گذرای محور مستقیم^{۱۹} » معروف است و با X'_d نشان داده می شود. رابطه I' و X'_d بصورت زیر است:

$$|I'| = \frac{ob}{\sqrt{2}} = \frac{|E_A|}{X'_d}$$

در رابطه بالا، $|I'|$ مقدار موثر جریان گذاری اتصال کوتاه می باشد.

جریانی که بلافاصله پس از وقوع اتصال کوتاه از آرمیچر عبور می کند به « جریان زیر گذرای اتصال کوتاه^{۲۰} » (I'') معروف است. و راکتانس سنکرون مربوط به این جریان به « راکتانس زیر گذرای محور مستقیم^{۲۱} » (X''_d) معروف است و از رابطه ی زیر تعریف می شود.

$$|I''| = \frac{oc}{\sqrt{2}} = \frac{|E_A|}{X''_d}$$

جریان زیر گذرا را اغلب « جریان rms متقارن اولیه » نیز می نامند.

سوال ۱:

تا کنون دانستیم که $I'' > I' > I$ می باشد. در مورد X_d, X'_d, X''_d کدامیک بیشترین مقدار و کدامیک کمترین مقدار را دارد؟ چرا؟

¹⁷ steady state short – circuit current

¹⁸ transient short circuit current

¹⁹ direct axis transient reactance

²⁰ subtransient short circuit current

²¹ direct axis subtransient reactance

بسته به نوع بررسی سیستم قدرت، از یکی از راکتانس‌های فوق (X_d, X'_d, X''_d) در مدار معادل ژنراتور سنکرون استفاده می‌شود و مدار معادل ژنراتور سنکرون در سه دوره زیر گذرا، گذرا و ماندگار متفاوت خواهد بود. شکل ۳۱ مدار معادل‌های ژنراتور سنکرون را در سه دوره ذکر شده نشان می‌دهد.

از آن جایی که زمان استمرار جریان اتصال کوتاه به زمان عملکرد سیستم حفاظت بستگی دارد همیشه نمی‌توان به آسانی تصمیم گرفت که کدام وراکتانس مورد استفاده قرار گیرد.

- معمولاً راکتانس زیر گذرا برای محاسبه‌ی زمان قطع مدار شکن‌ها بکار می‌رود. (X''_d)
- در مطالعات خطا برای تنظیم و هماهنگی رله‌ها X''_d راکتانس گذرا مورد نیاز است. (X'_d)
- در مطالعات پایداری گذرا هم از راکتانس گذرا (X'_d) استفاده می‌شود.

نمودار تغییرات جریان موثر اتصال کوتاه:

تاکنون دانستیم که جریان در لحظات پس از اتصال کوتاه بسیار زیاد بوده و پس از آن کاهش می‌یابد ($I'' > I' > I$). این تغییرات را می‌توان در شکل ۳۲ مشاهده کرد.

در نمودار ۳۲ زمان دوره زیر گذرا بوده و حدوداً ۲ سیکل (حدود ۴٪ ثانیه) می‌باشد. و t_{Ir} زمان گذرا بوده و تقریباً ۲۵ سیکل (۵٪ ثانیه) می‌باشد.

تغییرات راکتانس محور مستقیم ماشین :

راکتانس محور مستقیم ماشین در لحظات اولیه پس از اتصال کوتاه کمترین مقدار را داشته و به مرور زمان مقدارش افزایش می یابد . به گونه ای که داریم : $X_d'' < X_d' < X_d$

شکل ۳۳ تغییرات راکتانس محور مستقیم ژنراتور را با تقریب های پله ای آن نشان می دهد .

جدول زیر مثالی برای مقادیر راکتانس های محور مستقیم ماشین در دو نوع ژنراتور (ژنراتور قطب برجسته و کندانسور سنکرون) می باشد .

	X_d	(X_d')	(X_d'')
ژنراتورهای قطب برجسته	۰/۶-۱/۵	۰/۲-۰/۵	۰/۱۳-۰/۳۲
کندانسورهای سنکرون	۱/۲۵-۲/۲۰	۰/۳-۰/۶	۰/۱۹-۰/۳۸

مقادیر عمومی راکتانس ها در دو نوع ماشین سنکرون بر حسب pu

جدول فوق مثال مناسبی برای محاسبه ی X_d ، X_d' و X_d'' می باشد و همانطور که مشاهده می شود $X_d'' < X_d' < X_d$ می باشد .

مراحل محاسبات اتصال کوتاه متقارن در سیستم قدرت بی‌بار

با توجه به اینکه وقوع اتصال کوتاه سه فاز در سیستم قدرت، تقارن سیستم بهم نمی‌خورد، می‌توان برای تحلیل سیستم سه‌فاز در حین اتصال کوتاه از مدار معادل تکفاز استفاده نمود.

مراحل محاسبات اتصال کوتاه سیستم‌های قدرت بی‌بار بصورت زیر است:

مرحله ۱: رسم دیاگرام امپدانسی سیستم.

مرحله ۲: انتقال پارامترهای ژنراتور، موتور، ترانسفورماتور و خط انتقال به مبنای جدید (هم مبنا کردن) و قرار دادن مقادیر بر دیاگرام امپدانسی.

$$Z_{Pu} = \frac{z}{z_b}$$

$$V_{Pu} = \frac{v}{v_b}$$

$$S_{Pu} = \frac{s}{s_b}$$

$$I_{Pu} = \frac{I}{I_b}$$

$$S_b = \sqrt{3} v_b I_b$$

طبق فرمول زیر امپدانس‌ها را به مبنای جدید منتقل می‌کنیم.

$$Z_{pu}^{new} = Z_{pu}^{old} \times \left(\frac{s_b^{new}}{s_b^{old}} \right) \times \left(\frac{v_b^{old}}{v_b^{new}} \right)^2$$

مرحله ۳: رسم مدار معادل تونن سیستم قدرت از دیدگاه نقطه اتصال کوتاه شده.

- ولتاژ تونن (V_t): ولتاژ بی‌باری نقطه اتصال کوتاه قبل از وقوع اتصالی.
- امپدانس تونن (Z_{th}): راکتانس دیده شده از محل اتصالی با حذف منابع سیستم.

مرحله ۴: محاسبه جریان I'' در محل اتصالی از رابطه زیر:

$$I'' = \frac{V_{th}}{Z_{th}}$$

مرحله ۵: محاسبه جریان و ولتاژ بقیه عناصر سیستم طبق روابط KVL و KCL.

مثال ۲:

یک ژنراتور 20KV و 250KVA با راکتانس $x_d'' = 0.2 \text{ pu}$ به ترانسفورماتور 250MVA و 20/230 KV و $x_t = 0.2 \text{ pu}$ متصل است. اگر اتصال کوتاه سه‌فازی در طرف فشارقوی ترانسفورماتور رخ دهد، جریان زیر گذاری اتصال کوتاه را برحسب pu و آمپر و همچنین ولتاژ ترمینال‌های ژنراتور را برحسب KV محاسبه کنید. این سیستم قدرت قبل از اتصال کوتاه بی بار بوده و ولتاژ سمت فشار قوی آن 223.1 KV بوده است.

مثال ۳:

شکل زیر دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت را نشان می دهد.

مشخصات عناصر سیستم بشرح زیر است :

ژنراتور G_1	75MVA و 20 KV و $X_d''=15\%$
ژنراتور G_2	100MVA و 20 KV و $X_d''=20\%$
ترانسفورماتور T_1	150MVA و 132/20 KV و $X=12\%$
ترانسفورماتور T_2	175MVA و 132/20 KV و $X=8\%$
خط انتقال L	$X=0.02pu$ در قدرت مبنای 100MVA

هنگامی که در شرایط بی باری سیستم ، ولتاژ انتهای خط انتقال ۱۲۸ کیلو ولت بوده است ، اتصال کوتاه متقارنی در نقطه P بوقوع می پیوندد . جریان زیر گذاری اتصال کوتاه در محل وقوع و در هر یک از ژنراتورها را بدست آورید .

مثال ۴:

دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت به همراه مشخصات عناصر سیستم، در شکل زیر نشان داده شده است. هنگامی که در شرایط بی باری سیستم، ولتاژ انتهای خط انتقال سه برابر با ۱۸.۸ کیلوولت است. اتصال کوتاه مقارنی در نقطه F رخ می‌دهد. جریان زیر گذرا و جریان واقعی نقطه اتصال کوتاه رامحاسبه کنید.

$X_d''=15\%$ و 20KV و 75 MVA	ژنراتور G_1
$X_d''=20\%$ و 20KV و 100MVA	ژنراتور G_2
$X=12\%$ و 132.20KV و 150MVA	ترانسفورماتور T_1
$X=8\%$ و 132.20KV و 175MVA	ترانسفورماتور T_2
$X=0.02pu$ در قدرت مبنای 100MVA	خطوط انتقال L هر ۳ خط مشابه هستند

محاسبات اتصال کوتاه متقارن در سیستم قدرت باردار

در این حالت جریان هر قسمت در سیستم‌های قدرت شامی دو مولفه می‌شود :

- ۱- جریان عادی سیستم که جهت تامین بار از شبکه عبور می‌کند، این جریان در بی باری وجود ندارد.
 - ۲- جریان اتصال کوتاه گذرا یا زیرگذرا که فقط در اثر اتصال کوتاه و پس از اتصال کوتاه در سیستم به وجود می‌آید.
- بنابراین برای محاسبه جریان هر قسمت در سیستم قدرت باردار، باید دو مولفه فوق را در کنار هم در نظر گرفت و از جمع اثار جریان و ولتاژ اتصال کوتاه را بدست آورد.

مراحل محاسبات اتصال کوتاه در سیستم‌های قدرت باردار:

۱. ابتدا فرض می‌کنیم که هیچ اتصال کوتاهی در سیستم قدرت اتفاق نیفتاده است. در این صورت جریان‌های عبوری از سیستم جهت تامین بارها را محاسبه می‌کنیم. (در سیستم‌های قدرت بزرگ برای محاسبات حالت عملکرد عادی سیستم از پخش بار استفاده می‌شود).
۲. در مرحله دوم فرض می‌کنیم که سیستم بی‌بار است و مسئله را مانند روش بی باری (۵ مرحله محاسبات اتصال کوتاه بی باری) حل می‌نماییم. در این صورت جریان اتصال کوتاه گذرا (I') یا زیرگذرا (I'') را محاسبه می‌کنیم.
۳. در مرحله سوم جریان هر قسمت را از روش جمع آثار با توجه به جریان قبل از اتصال کوتاه و جریان بی باری اتصال کوتاه محاسبه می‌شود.

مثال ۵:

دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت در شکل زیر نشان داده شده است. مشخصات سیستم بشرح زیر می باشد:

ژنراتور G_1	20MVA و 13.8KV و $X_d''=10\%$
ژنراتور G_2	10MVA و 13.8KV و $X_d''=10\%$
ترانسفورماتورها	20MVA و 66/13.8 و $X=8\%$
خطوط انتقال	$X=0.04 \text{ pu}$ در مبنای 20MVA و 66KV

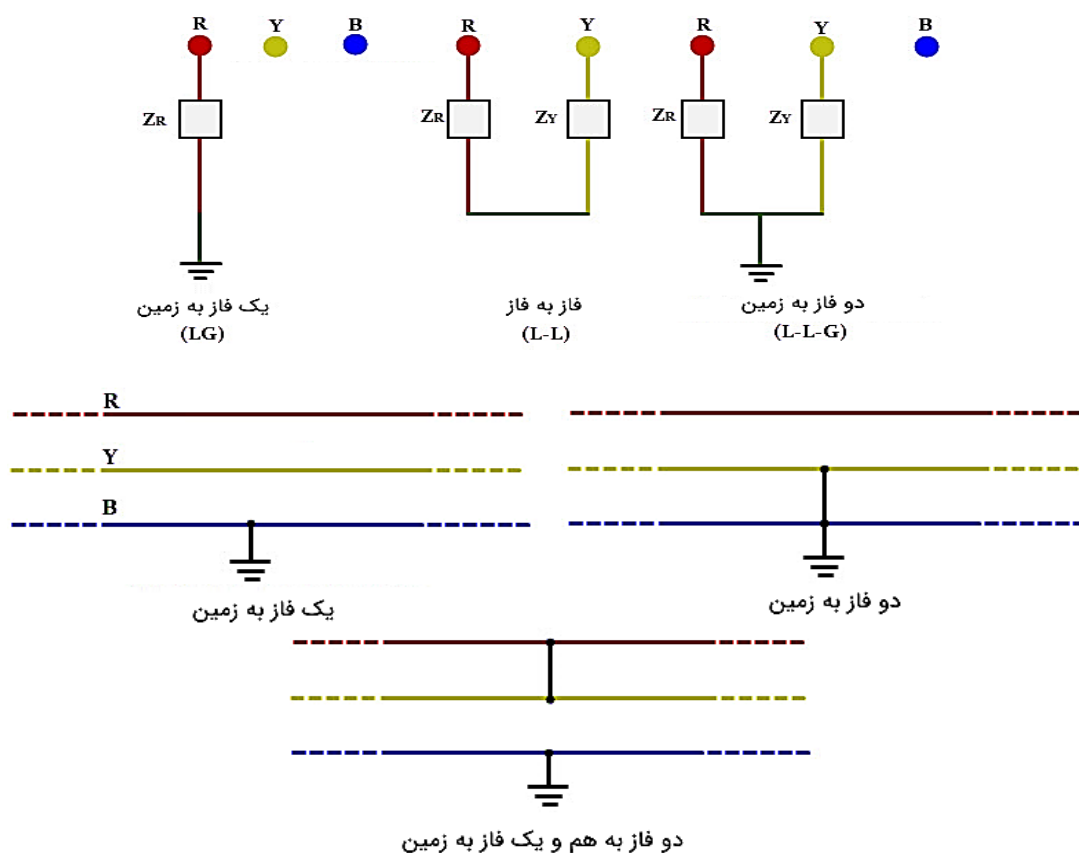
بر اثر اتصال کوتاه متقارنی در شین ۳، جریان اتصال کوتاه در محل وقوع و جریان های اتصال کوتاه عبوری از ژنراتورها، ترانسفورماتورها و خطوط انتقال را بدست آورید. قبل از اتصال کوتاه، ولتاژ پایانه ژنراتور G_2 (نقطه b) برابر با $5^\circ \angle 14/0.7$ کیلوولت و قدرت جذب شده بار در شین ۳ در ولتاژ $0^\circ \angle 65$ کیلوولت و ضریب قدرت ۰/۹ پس از فاز $P_D=25\text{MW}$ بوده است.

فصل دوم: مولفه‌های متقارن و خطاهای نامتقارن^{۲۳}

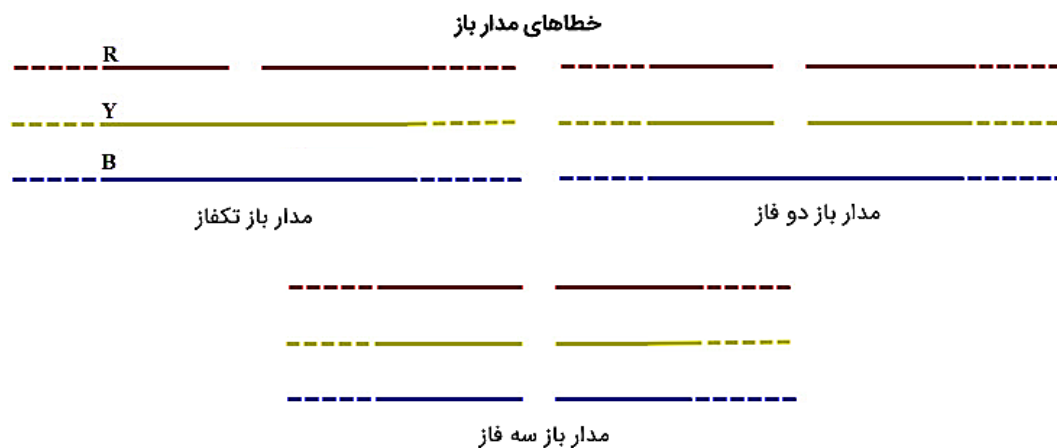
مقدمه

معمولاً سیستم‌های قدرت تحت شرایط متقارن کار می‌کنند. در فصل گذشته با فرض اینکه بین سه فاز تقارن کامل وجود دارد، مطالعات خود را انجام دادیم. امپدانس‌های بار در هر سه فاز یکسان فرض شدند و مقادیر مؤثر جریان‌ها و ولتاژها باتوجه به تقارن سه فاز مورد نظر قرار گرفتند. در نتیجه براساس این فرضیات محاسبات سیستم قدرت را برای یک فاز انجام دادیم. قدرت کل (اکتیو و یا راکتیو) نیز از سه برابر کردن قدرت یک فاز بدست می‌آمد. در یک سیستم متقارن، جمع جریان‌های سه فاز در همه‌ی زمان‌ها برابر صفر بوده و جریانی بین نقاط صفر ژنراتورها و ترانسفورماتورها و زمین برقرار نمی‌باشد. عدم وجود این جریان باعث می‌شود تا ولتاژ تمام نقاط صفر سیستم با پتانسیل زمین برابر باشند که این ولتاژها را برابر فرض می‌کنیم.

باوجود اینکه سعی و تلاش فراوانی در شبکه‌های توزیع و انتقال صورت می‌گیرد تا بارهای برنامه ریزی شده شرایط تقارن را برای سیستم ایجاد کنند، متأسفانه در شرایط غیر عادی نظیر اتصال کوتاه‌های نامتقارن و یا گسیختگی هادی‌های خطوط انتقال، سیستم‌ها نامتقارن می‌گردند. بعضی از این خطاهای نامتقارن شکل زیر نشان داده شده‌اند. در این شکل خطاها با امپدانس صفر در نظر گرفته شده‌اند. لیکن اغلب خطاها از طریق امپدانس‌های غیر صفر بوجود می‌آیند.



²³ unsymmetrical Faults



در یک سیستم نامتقارن، جریان‌ها در سه فاز و هم‌چنین ولتاژها، دارای تقارن نیستند. بنابراین نمی‌توان سیستم را با یک فاز مطالعه نمود. جمع جریان‌های نامتقارن سه فاز صفر نبوده و لذا جریان I_n بین نقاط صفر سیستم برقرار می‌گردد. بعنوان مثال یک ژنراتور سه فاز را در نظر بگیرید که اتصال کوتاه یک فاز به زمین^{۲۴} در آن منجر به عبور جریان اتصال کوتاه I_f در فاز a گردد که با Z_n نشان داده ایم. جریان خطا در این شکل برابر است با:

$$I_f = I_n = I_a + I_b + I_c$$

پتانسیل زمین را برابر صفر منظور می‌کنیم. پتانسیل نقطه صفر ژنراتور نیز از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_n = -Z_n I_n$$

²⁴Single _ Line-to _ Ground Faut

همانطوری که از شکل مذکور پیداست ولتاژهای فاز V_a ، V_b ، V_c نسبت به زمین در نظر گرفته شده اند ولتاژ هر فاز نسبت به نقطه صفر از اختلافات ولتاژ آن فاز و ولتاژ نقطه صفر بدست می آید. برای مثال در فاز a داریم:

$$V_{an} = V_a - V_n = V_a + Z_n I_n$$

معرفی مولفه های متقارن^{۲۵}

روش مولفه های متقارن که در سال ۱۹۱۸ میلادی توسط «فورتنسکیو»^{۲۶} معرفی شد برای تبدیل بردارهای یک سیستم سه فاز نامتقارن به بردارهای سه سیستم سه فاز متقارن بکار میرود. مولفه های این سه سیستم متقارن عبارتند از:

الف) مولفه های توالی مثبت^{۲۷} شامل سه بردار که از نظر قدر مطلق برابر بوده، زاویه های فاز آنها نسبت به یکدیگر ۱۲۰ درجه اختلاف داشته و توالی فاز این مولفه ها با سیستم اصلی یکسان است، یعنی توالی فاز بصورت abc می باشد. توالی فاز مثبت (abc) می باشد. توالی فاز مثبت (abc) به این مفهوم است که V_b نسبت به V_a به میزان ۱۲۰ درجه عقب تر است و بردار V_c نیز نسبت به V_b به اندازه ۱۲۰ درجه تاخیر فاز دارد.

ب) مولفه های توالی منفی^{۲۸} شامل سه بردار که از نظر قدر مطلق برابر بوده، زاویه های فاز آنها نسبت به یکدیگر ۱۲۰ درجه اختلاف داشته و توالی فاز این مولفه ها برعکس سیستم اصلی است. یعنی توالی فاز (abc) می باشد.

ج) مولفه های توالی صفر^{۲۹} شامل سه بردار که از نظر قدر مطلق برابر بوده و اختلاف زاویه فاز آنها نسبت به یکدیگر صفر می باشد.

اگر بردارهای سیستم اصلی، ولتاژهای V_a ، V_b ، V_c باشند، بردارهای مولفه های متقارن سیستم های توالی مثبت، منفی و صفر را با اندیس اضافی نشان می دهیم.

بردارهای V_{a+} ، V_{b+} ، V_{c+} مربوط به سیستم متقارن توالی مثبت، بردارهای V_{a-} ، V_{b-} ، V_{c-} مربوط به سیستم متقارن توالی منفی و بردارهای V_{a0} ، V_{b0} ، V_{c0} مربوط به سیستم متقارن توالی صفر می باشند. برای اینکه بردارهای سیستم اصلی به مولفه های متقارن قابل تجزیه باشند داریم:

$$V_a = V_{a0} + V_{a+} + V_{a-}$$

$$V_b = V_{b0} + V_{b+} + V_{b-}$$

$$V_c = V_{c0} + V_{c+} + V_{c-}$$

²⁵ Symmetrical Components

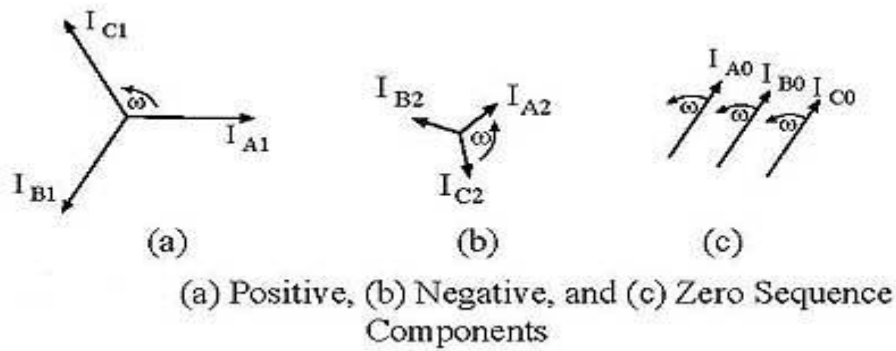
²⁶ Fortesque

²⁷ Positiv _ Sequence Components

²⁸ Negativ _ Sequence Components

²⁹ Zero _ Sequence Components

شکل زیر مولفه های این سه سیستم متقارن را نشان می دهد .



بامعرفی عدد مختلط $a = 1 \angle 120^\circ$ می توان بردارهای فازهای b و c را در سیستم های متوالی مثبت و منفی برحسب فاز a این توالی ها نوشت . روابط زیر اطلاعات بیشتری در مورد این عدد مختلط بدست می دهند .

$$a = 1 \angle 120^\circ = -0.5 + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ = -0.5 - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^3 = 1 \angle 360^\circ = 1 \angle 0^\circ = 1$$

$$a^* = a^2$$

$$1 + a + a^2 = 0$$

شکل (۱۲-۵) نمایش بردارهای a ، a^2 و 1 را نشان می دهد .

حال می توان روابط ولتاژ ها را در سه سیستم متقارن بصورت زیر نوشت :

$$V_{b+} = a^2 V_{a+}$$

$$V_{c+} = a V_{a+}$$

$$V_{b-} = a V_{a-}$$

$$V_{c-} = a^2 V_{a-}$$

$$V_{b0} = V_{a0}$$

$$V_{c0} = V_{a0}$$

روابط فوق را در معادلات قرار می دهیم :

$$V_a = V_{a_0} + V_{a_+} + V_{a_-}$$

$$V_b = V_{a_0} + a^2 V_{a_+} + V_{a_-}$$

$$V_c = V_{a_0} + a V_{a_+} + V_{a_-}$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a_0} \\ V_{a_+} \\ V_{a_-} \end{bmatrix}$$

و یا :

$$V = AV_s$$

$$V_s = A^{-1}V$$

که در آنها :

$$V = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad V_s = \begin{bmatrix} V_{a_0} \\ V_{a_+} \\ V_{a_-} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

اگر بجای ولتاژها ، جریان های خطی سیستم را بکار ببریم داریم :

$$I = AI_s$$

$$I_s = A^{-1}I$$

که در آنها :

$$I = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad I_s = \begin{bmatrix} I_{a_0} \\ I_{a_+} \\ I_{a_-} \end{bmatrix}$$

از این به بعد برای سهولت ، در بردارهای I_s و V_s اندیس a را حذف کرده و آنها را به این صورت نمایش می دهیم :

$$I_s = \begin{bmatrix} I_o \\ I_+ \\ I_- \end{bmatrix} \quad V_s = \begin{bmatrix} V_o \\ V_+ \\ V_- \end{bmatrix}$$

معادله را به ترتیب زیر تکرار می کنیم :

$$\begin{bmatrix} I_o \\ I_+ \\ I_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

واز آنجا I_o را بدست می آوریم :

$$I_o = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c)$$

این رابطه نشان می دهد اگر مجموع جریان های خطی در یک سیستم نامتقارن صفر باشد مولفه های توالی صفر وجود نخواهند داشت. بنابراین $I_o = 0$ بوده است و در نتیجه چنانچه سیم برگشت وجود نداشته باشد جریان های سیستم دارای مولفه های توالی صفر نمی باشند:

$$I_o = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) = \frac{1}{3} I_n$$

بنابراین در صورت وجود سیم برگشت ، جریان توالی صفر وجود داشته و مقدار آن $\frac{1}{3}$ جریان سیم برگشت می باشد .

معادله مولفه های متقارن ولتاژ های خطی بر حسب ولتاژهای سیستم اصلی را می توان به این صورت نشان

$$\begin{bmatrix} V_{ab^o} \\ V_{ab^+} \\ V_{ab^-} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix}$$

واز آنجا :

$$V_{ab^o} = \frac{1}{3} (V_{ab} + V_{bc} + V_{ca})$$

از آنجائیکه جمع ولتاژهای خطی یک سیستم همیشه برابر صفر است لذا ولتاژهای خطی یک سیستم فاقد مولفه های توالی صفر می باشند .

مثال ۶:

در یک بار سه فاز متقارن با اتصال مثلث، مطابق شکل زیر، جریان های خطی عبارتند از:

$$I_a = 100 \angle 45^\circ \text{ A}$$

$$I_b = 150 \angle -60^\circ \text{ A}$$

الف) مولفه های متقارن جریان های خطی و جریان های فازی را بدست آورید .

ب) جریان های فازی را که از امپدانس های Z عبور می کنند محاسبه کنید .

