

فصل اول

تحليل عيب های متقارن

Symmetrical Fault Analysis

۱-۱ مقدمه

عيب هاي سيستم های قدرت ناشي از حرارت آني تحت شرایط بهره برداري معيوب تجهيزات و برخورد صاعقه بر خطوط انتقال رخ مي دهد که در اينصورت براي حفاظت کل سيستم قدرت توسط رله هاي حفاظتي و با فرمان به کلید هاي قدرت هر سه فاز سيستم قطع خواهد شد. بنابر اين براي انتخاب صحيح کلید هاي قدرت و رله هاي حفاظتي ناچاريم مقدار جريان عبوري در آنها را در مواقع قبل و بعد از عيب و مخصوصا عيب سه فاز بدانيم و اين دليل چنين بررسي هائي را نشان مي دهد .

بايستي بدانيم اکثر عيوبی که اتفاق مي افتد سه فاز نيستند بلکه اتصال کوتاه تکفاز به زمين و دو فاز به زمين و بهم نيز اتفاق مي افتد که عيب های آخر تحت عنوان عيب های نامتقارن مي باشد بعلت اهميت بررسي عيب های متقارن سه فاز در ابتدا به آن پرداخته مي شود.

يك شبکه الكتريكي از مجموعه ژنراتورهاي سنكرون، ترانسفورماتورها، خطوط انتقال و بارها تشكيل شده است. برای سادگی، در شرایط بهره برداري شبکه قدرت در حين وقوع عيب مي توان از تأثير بارها صرفنظر نمود. زیرا در اين حالت مقدار پايين افتادن ولتاژ (Voltage dip) ناشي از وقوع اتصال کوتاه بسيار کم است و بنابر اين مقدار جريان عبوري از بارها در مقايسه با جريان هاي عيب قابل صرفنظر کردن مي باشند.

ژنراتورهاي سنكرون در عيب های اتصال کوتاه داراي مشخصه هاي رفتاري متغير با زمان مي باشند. در حين اتصال کوتاه مقدار شار بر قطب در ارتباط با تغييرات گذراي سيم پيچ هاي ميدان و دمپر بصورت ديناميكي تغيير خواهند کرد. بنابر اين در چند سيکل اول مقدار راکتانس از مقادير پايين راکتانس زیرگذرا به

سمت مقادیر بالای راکتانس گذرا و سپس در حالت ماندگار به مقادیر بالای راکتانس سنکرون تغییر خواهد کرد.

بدلیل وجود زمان جرقه (Arc) در داخل کلیدهای قدرت در حین قطع سیستم قدرت لازم است تا در حین اتصال کوتاه مقدار راکتانس مناسبی از ژنراتور سنکرون موجود باشد.

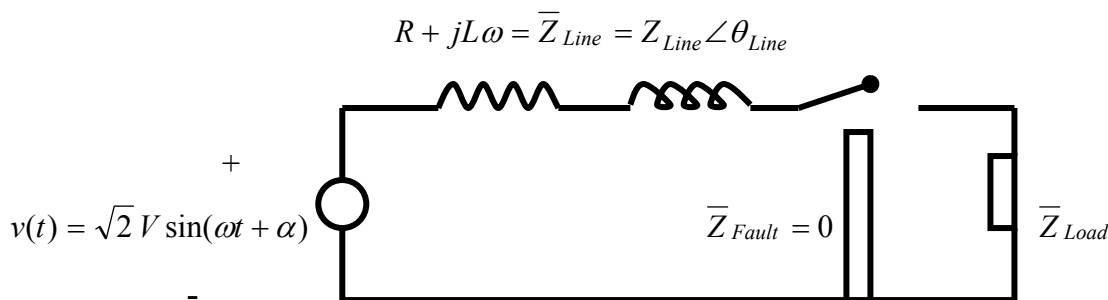
۲-۱ عملکرد قطع و وصل در مدار سری اهمی-سلفی

در این قسمت فرآیند اتصال کوتاه گذرا در یک خط انتقال کوتاه بررسی می شود. برای ساده سازی مساله فرضیات زیر انجام می شود:

الف- منبع ولتاژ (ژنراتور سنکرون) در هنگام اتصال کوتاه دارای عملکرد و خواص کلی یک ماشین سنکرون می باشد.

ب- با بی بار شدن خط انتقال عیب اتصال کوتاه نیز برطرف می شود.

پ- مقدار ظرفیت خازنی خط انتقال قابل صرف نظر بوده و خط انتقال به صورت ساده با یک امپدانس RL نشان داده می شود.



$$\bar{Z}_{Line} = R + jL\omega = Z \angle \theta_{Line} = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2} \angle \tan^{-1} \frac{L\omega}{R} \quad (1-1)$$

$$\bar{Z} = \bar{Z}_{Line} + \bar{Z}_{Fault} \quad (2-1)$$

فرض می شود که عیب اتصال کوتاه متقارن (سه فاز) در لحظه $t = 0$ رخ می دهد. پارامتر اختلاف فاز α مقدار موج ولتاژ لحظه ای را در حین وقوع اتصال کوتاه کنترل می کند. براساس تئوری مدارهای الکتریکی پس از وقوع اتصال کوتاه جریان مدار ترکیبی از دو بخش ماندگار و گذرا می باشد.

$$i(t) = i_s(t) + i_t(t) \quad s = \text{steady state} \quad t = \text{transient} \quad (3-1)$$

ازجریان بار در مقابل جریان عیب صرف نظر می شود.

$$i_s(t) = \frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \theta) \quad \text{steady state current} \quad (4-1)$$

$$i_t(t) = i_t(0)e^{-\frac{R}{L}t} \quad \text{transient current} \quad (5-1)$$

$$i(0) = i_s(0) + i_t(0) = 0 \rightarrow i_t(t) = -i_s(0) \quad (6-1)$$

به عبارت دیگر در لحظه $t=0$ مدار اتصال کوتاه بسته می شود و در آن موقع هیچ جریانی عبور نمی کند. در این صورت $V(0) = \sqrt{2} V \sin \alpha$ بوده و مدار بصورت یک بار اهمی-سلفی با ثابت زمان $\frac{R}{L}$ تبدیل می شود. این نتیجه با استفاده از رابطه و معادله دیفرانسیل زیر حاصل می شود. پس در رژیم سینوسی داریم:

$$\begin{cases} i_s(t) = \frac{v(t)}{Z} = \frac{\sqrt{2} V \sin(\omega t + \alpha)}{Z \angle \theta} \rightarrow i_s(t) = \frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \theta) \\ L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = v(t) = \sqrt{2} V \sin(\omega t + \alpha) \Rightarrow i(t) = A \sin(\omega t + \alpha - \theta) \end{cases} \quad (7-1)$$

$$\begin{cases} i_t(t) = -i_s(0)e^{-\frac{R}{L}t} \\ i_s(0) = \frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\alpha - \theta) \end{cases} \rightarrow i_t(t) = -\frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\alpha - \theta) e^{-\frac{R}{L}t} \quad (8-1)$$

$$i(t) = i_s(t) + i_t(t) = \frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \theta) - \frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\alpha - \theta) e^{-\frac{R}{L}t} \quad (9-1)$$

جریان کل شامل قسمت اول جریان مولفه سینوسی یا پاسخ ماندگار $(\frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \theta))$ تحت عنوان

"جریان اتصال کوتاه متقارن" و قسمت دوم جریان مولفه DC یا پاسخ گذرا $(-\frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\alpha - \theta) e^{-\frac{R}{L}t})$

می باشد. این نتیجه از حل معادله دیفرانسیلی فوق در حالت رژیم سینوسی و گذرا نیز بدست می آید.

با صرف نظر از خطای نمائی در لحظات اولیه، جریان پیک اولیه $(t=0)$ برابر است با:

$$i_{mm} = i_{s,peak} + i_t(0) = \frac{\sqrt{2} V}{Z} - \frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\alpha - \theta) \quad (10-1)$$

اگر مقدار مقاومت خط کوچک باشد (مدار تقریباً سلفی خالص باشد)، در آن صورت داریم:

$$\theta = 90 \rightarrow i_{mm} = \frac{\sqrt{2} V}{Z} (1 + \cos \alpha) = 2 \frac{\sqrt{2} V}{Z} \quad (11-1)$$

حداکثر جریان در $\alpha = 0$ اتفاق می افتد.

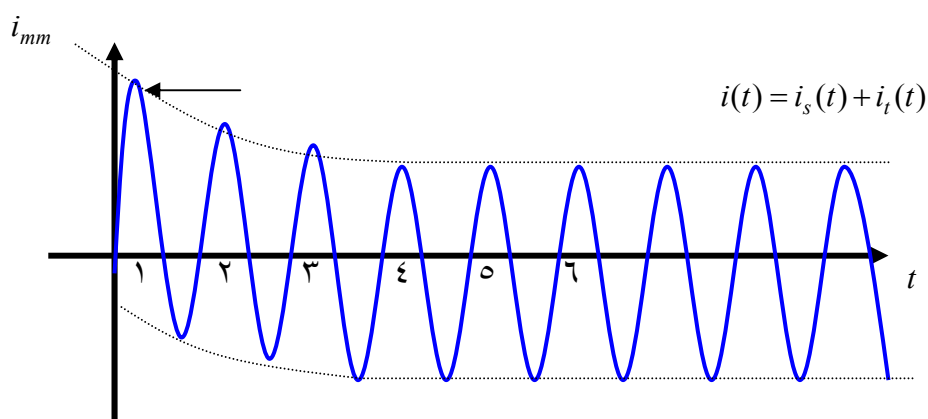
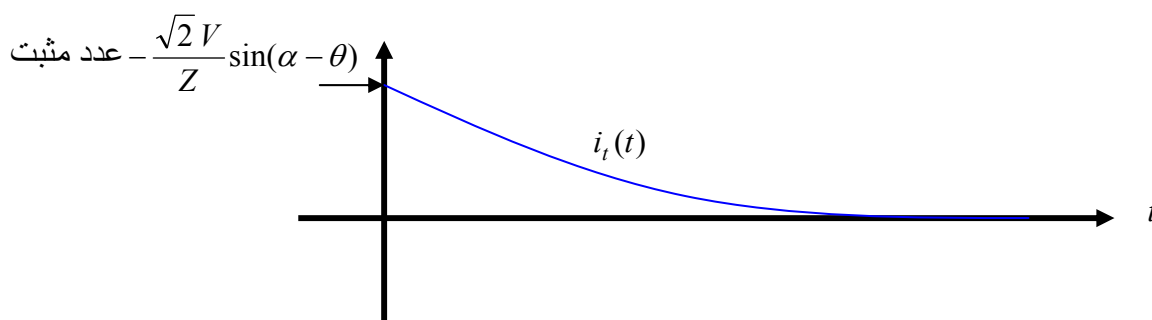
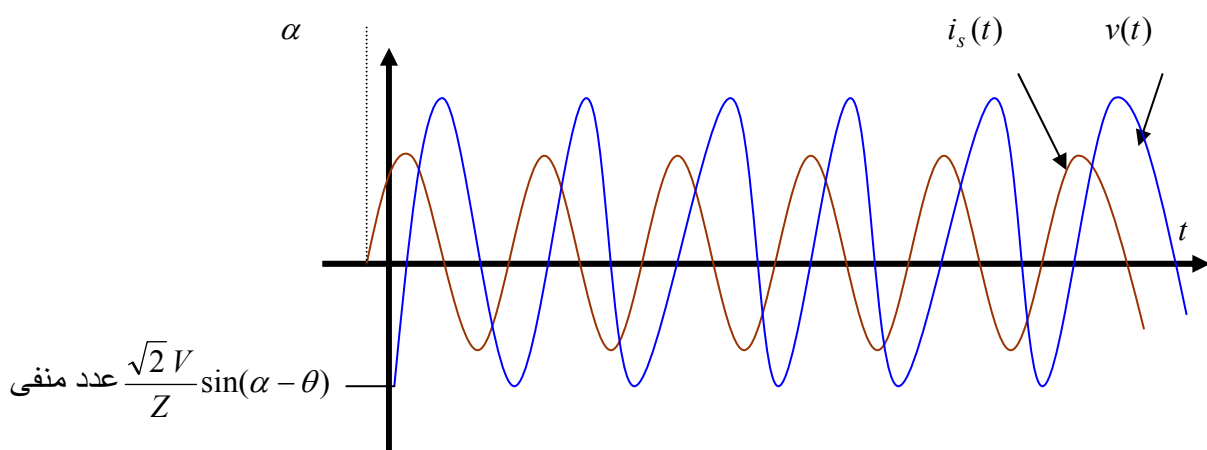
$$\alpha = 0 \rightarrow i_{mm} = 2 \frac{\sqrt{2} V}{Z} \quad (12-1)$$

جریان پیک اولیه i_{mm} معیاری برای انتخاب کلید قدرت می باشد. برای انتخاب کلیدهای قدرت مقدار

جریان اتصال کوتاه لحظه ای i_{mm} به عنوان حداکثر مقدار جریان ممکن مهم است (جریان زیر گذرا). در

کلیدهای قدرت مدرن طراحی بصورتی است که پس از جریان چند پریود اول (۵ پریود یا کمتر) جریان قطع (Interrupt Current) در نظر گرفته می شود (جریان گذرا).

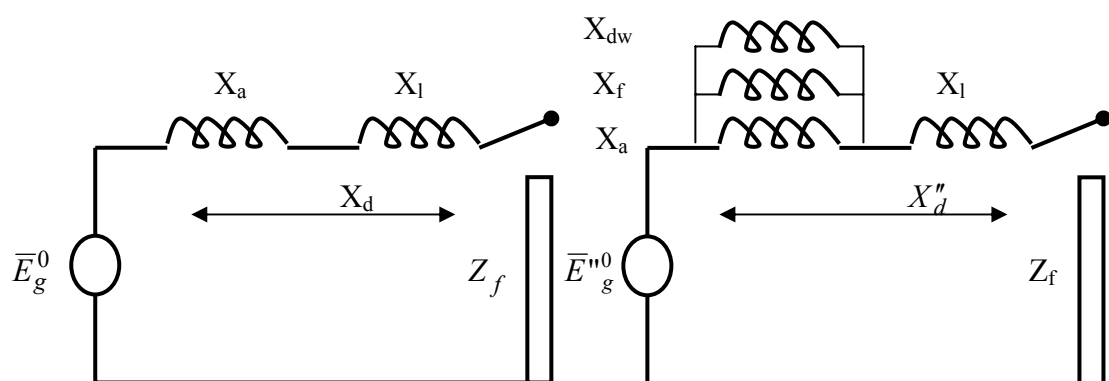
با کنار گذاشتن جریان پریودهای اول هنوز مقداری جریان مولفه DC وجود دارد و در کنار جریان قطع موجود می باشد. بدلیل مشکل بودن محاسبه مولفه DC، مخصوصا در شبکه های بزرگ و پیچیده، فقط جریان اتصال کوتاه متقارن سه فاز محاسبه می شود و سپس توسط يك ضریب مولفه DC لحاظ می شود.



i_{mm} = Maximum Momentary Current

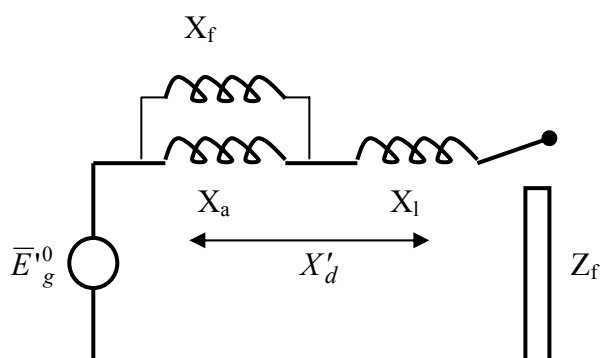
۳-۱ جریان اتصال کوتاه ماشين سنكرون بى بار

تحت شرایط اتصال کوتاه مداوم (ماندگار)، عكس العمل آرمیچر ژنراتور تولید شار ضد مغناطیس کنندگی می کند. تاثیر این عمل بوسیله راکتانس عكس العمل X_a سری و نیروی محرکه مغناطیسی (EMF) القایی مدل می شود. با ترکیب این راکتانس با راکتانس ناشی (Leakage Reactance) ماشین X_ℓ ، راکتانس سنكرون ماشین X_d (راکتانس سنكرون محور مستقیم در ماشین قطب برجسته) بدست می آید. مقاومت آرمیچر به خاطر كوچك بودن صرفنظر می شود. بنا براین مدل اتصال کوتاه ماندگار ماشین سنكرون برای هر وضعیت به صورت زیر است.



مدل اتصال کوتاه ماندگار

مدل تقریبی در پریود زیر گذرای اتصال کوتاه



مدل تقریبی در پریود گذرای اتصال کوتاه

$$X_d'' < X_d' < X_d \quad (۱۳-۱)$$

فرض می شود ژنراتور سنكرون در ابتدا بصورت مدار باز بوده و سپس بطور ناگهانی اتصال کوتاه می شود. ماشین سنكرون باعبوراز مراحل گذرا و زیر گذرا وارد مرحله ماندگار می شود، در این حالت کلید قدرت در چند سیكل اول از جریانهای زیاد قبل از رسیدن به شرایط ماندگار، صرفنظر می کند. بلافاصله پس

از برقراري شرایط اتصال کوتاه جریان مولفه DC در تمامی فازها ظاهر می شود که البته اندازه آنها با هم متفاوت می باشد زیرا برای هر فاز مقدار شکل موج ولتاژ در لحظه وقوع اتصال کوتاه فرق می کند. بر طبق شکلی که ترسیم خواهیم نمود جریان اتصال کوتاه ژنراتور در چند سیکل اولیه خیلی بیشتر از سیکل های بعدی می باشد و علت آن این می باشد که شار مغناطیسی در فاصله هوایی ماشین در لحظه وقوع اتصال کوتاه بسیار زیاد است و پس از عبور اتصال کوتاه از آرمیچر شار مذکور نیز کاهش می یابد. جریان های مولفه DC بصورت مجزا از هم بصورت تجربی در نظر گرفته می شوند و بنا براین برای حالت اتصال کوتاه فقط نیاز داریم تا به جریان های اتصال کوتاه سه فاز متقارن بپردازیم. بلافاصله پس وقوع اتصال کوتاه، جریان اتصال کوتاه متقارن بوسیله راکتانس نشی ماشین محدود می شود زیرا شار فاصله هوایی نمی تواند سریعتر و بطور همزمان تغییر کند (براساس قضیه شار ثابت لینک شده است) در این صورت برای غلبه بر ضد مغناطیس کنندگی ناشی از جریان اتصال کوتاه آرمیچر جریان هایی از سیم پیچ های آرمیچر و میدان ظاهر شده و به شار اصلی کمک می کند.

سیم پیچی آرمیچر دارای اندوکتانس نشی پایینی بوده و مقدار اندوکتانس نشی سیم پیچ میدان بیشتر می باشد بنابراین ثابت زمانی سیم پیچی آرمیچر خیلی کمتر از ثابت زمانی سیم پیچی میدان خواهد بود بنابراین در بخش اولیه وقوع جریان اتصال کوتاه در سیم پیچی آرمیچر، سیم پیچی میدان و آرمیچر بصورت یک ترانسفورماتور که دارای جریان های القایی بوده و می توان تاثیر آنها را بصورت X_f (برای سیم پیچی میدان) و X_{dw} (برای سیم پیچی دمپر)، بصورت موازی با سیم پیچ آرمیچر X_a و نسبت تبدیل واحد در نظر گرفت. بدلیل اینکه ثابت زمانی سیم پیچی آرمیچر کمتر از سیم پیچی میدان است، بنابراین در بخش دوم وقوع اتصال کوتاه در سیم پیچی آرمیچر (شرایط گذرا) پس از طی شرایط فوق گذرا سیم پیچ دمپر X_{dw} بصورت مدار باز عمل نموده و پس از عبور از شرایط گذرا و رسیدن به حالت ماندگار جریان اتصال کوتاه، سیم پیچ میدان X_f نیز مدار باز خواهد شد.

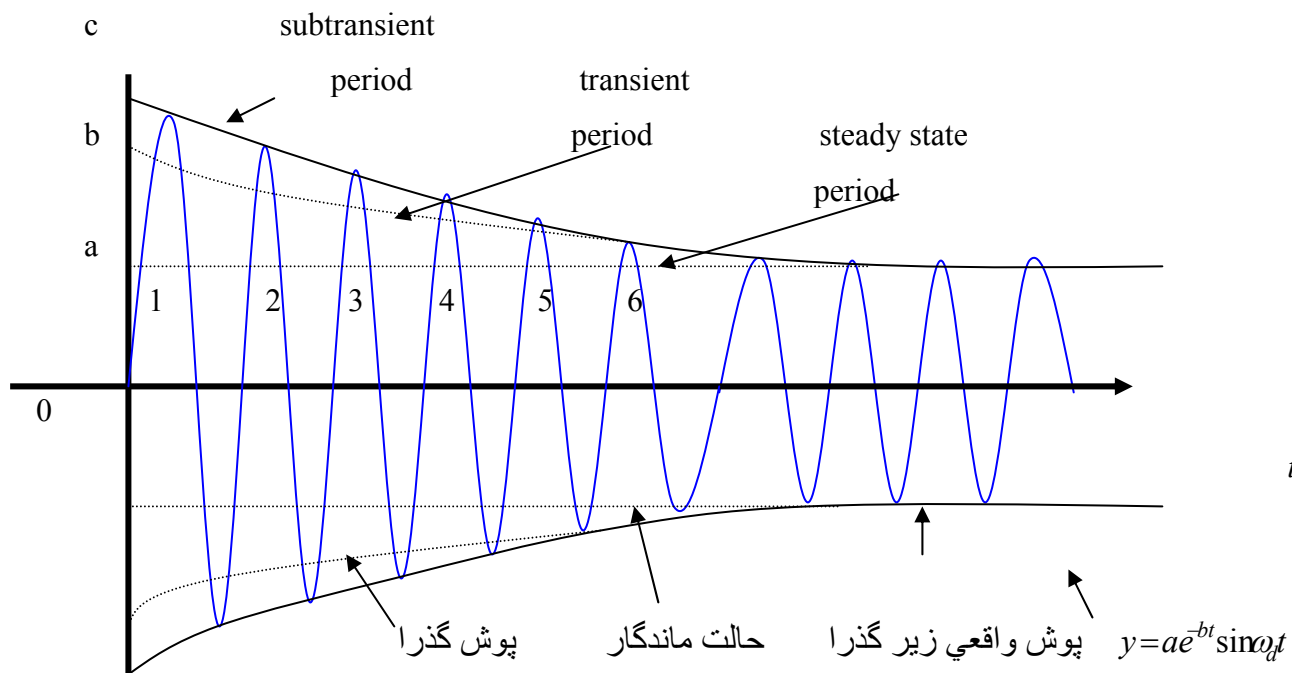
$$\begin{aligned} X_d'' &= (X_a \parallel X_f \parallel X_{dw}) + X_\ell && \text{subtransient reactance} \\ X_d' &= (X_a \parallel X_f) + X_\ell && \text{transient reactance} \\ X_d'' &= X_a + X_\ell && \text{synchronous reactance} \\ X_d'' &< X_d' < X_d \end{aligned} \quad (14-1)$$

بنابراین در این حالت ماشین سنکرون دارای راکتانس متغیر با زمان خواهد بود. هرگاه شکل موج جریان اتصال کوتاه ژنراتور سنکرون را پس از بین رفتن جریان مولفه DC مشاهده کنیم بصورت شکل زیر خواهد بود. لذا جریان اتصال کوتاه ماشین سنکرون به سه پریود تقسیم می شود.

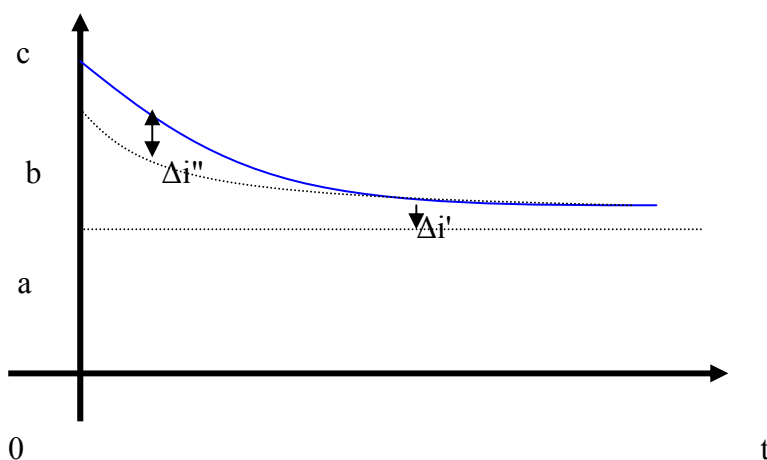
- پریود زیر گذرای اولیه: وقتی که جریان زیاد بوده و ماشین دارای راکتانس زیرگذرا باشد.

- پریود گذرای میانی: وقتی که ماشین دارای راکتانس گذرا باشد.

- پریود حالت ماندگار: ماشین دارای راکتانس سنکرون باشد.



جریانهای اتصال کوتاه متقارن در ماشین سنکرون



پوش جریان اتصال کوتاه متقارن سه فاز

اختلاف پوشهای گذرا و زیر گذرا توسط $\Delta i''$ (بدر نظر گرفتن جریان سیم پیچ آرمیچر) نشان داده می شود که با توجه به ثابت زمانی سیم پیچ آرمیچر به سرعت از بین می رود (به صورت نمایی). بطور مشابه $\Delta i'$ ها اختلاف بین پوشهای منحنی های ماندگار و گذرا می باشد که با توسط ثابت زمانی سیم پیچ میدان به سمت صفر می رود (بصورت منحنی نمایی).

$$I = \frac{oa}{\sqrt{2}} = \frac{E_g^0}{X_d}$$

Steady state current (rms)

$$I' = \frac{ob}{\sqrt{2}} = \frac{E_g^0}{X_d'}$$

Transient current (rms) excluding DC component

$$I'' = \frac{oc}{\sqrt{2}} = \frac{E_g^0}{X_d''}$$

Subtransient current (rms) excluding DC component X_d ,

X_d', X_d''

Direct axis synchronous, transient, sub transient reactance

$$\bar{E}_g^0$$

Per phase no load voltage (rms)

$$\Delta i'' = \Delta i''_0 e^{-\frac{t}{\tau_{dw}}}$$

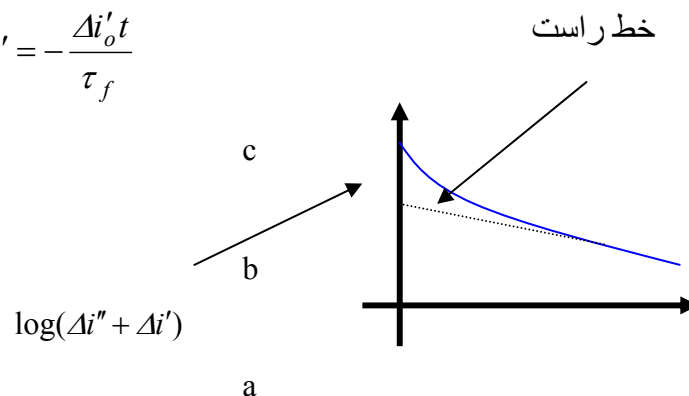
ثابت زمانی سیم پیچی آرمیچر

$$\Delta i' = \Delta i'_0 e^{-\frac{t}{\tau_f}}$$

ثابت زمانی سیم پیچی میدان

$$(\tau_{dw} \ll \tau_f) \rightarrow (t \gg \tau_{dw}) \rightarrow (\Delta i'' \Rightarrow 0)$$

$$\log(\Delta i'' + \Delta i') \Big|_{t \gg \tau_{dw}} \approx \log \Delta i' = -\frac{\Delta i'_0 t}{\tau_f}$$



بنابراین برای زمان های $t \gg \tau_{dw}$ منحنی $\log(\Delta i'' + \Delta i')$ تبدیل به یک خط راست با شیب $-\Delta i'_0 e^{-\frac{t}{\tau_f}}$ می

شود با برون یابی این خط مستقیم در محور عمودی و در نقطه b که همان نقطه مورد نظر در منحنی جریان اتصال کوتاه سه فاز متقارن ژنراتور سنکرون می باشد، تلاقی پیدا می کند.

$$t = 0 \rightarrow \Delta i' \Big|_{t=0} = \Delta i'_0 e^{-\frac{t}{\tau_f}} \Big|_{t=0} = \Delta i'_0 = ab$$

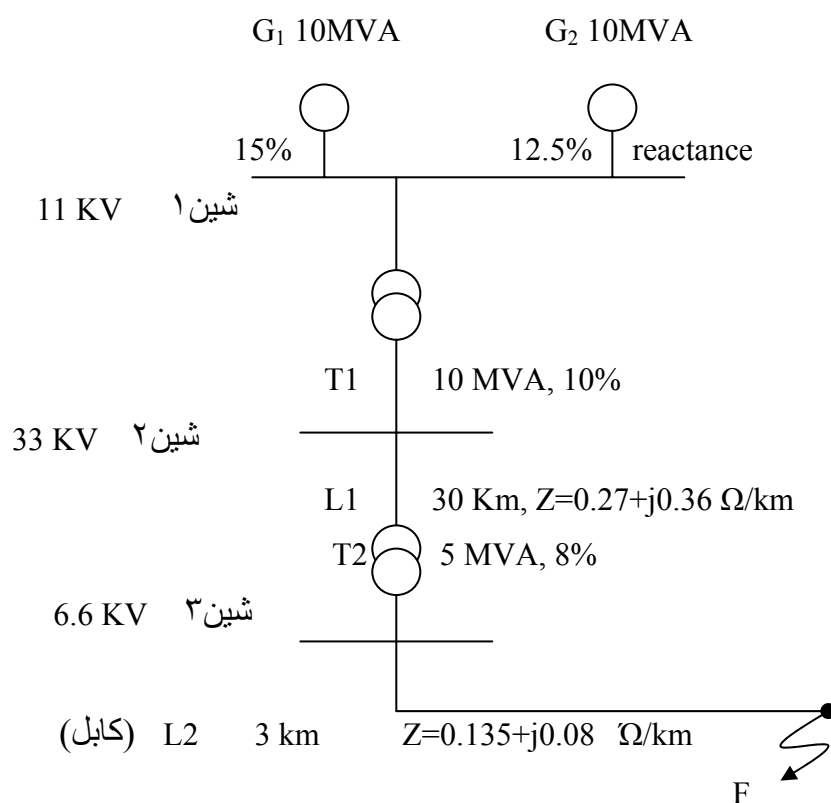
چون راکتانس ماشین ها علاوه بر مقدار تحریک به اشباع مغناطیسی نیز وابسته می باشد بنابراین بسته به نوع ماشین مقدار آنها در محدوده مشخصی قرار خواهد گرفت (جدول ۹، ۱ صفحه ۲۸۰ مرجع Nagrath).

موارد مهم:

- در حالت نرمال مقدار راکتانس زیرگذرای موتور ها و ژنراتورهای سنکرون در مدارهای اتصال کوتاه برای محاسبه جریان لحظه ای استفاده می شود (محاسبه جریان زیرگذرا)
- در حالت قطع برای کلیدهای قدرت (به غیر آنها که به طور لحظه ای باز هستند) برای ژنراتورهای سنکرون از راکتانس زیر گذرا و برای موتور های سنکرون از راکتانس گذرا استفاده می شود (محاسبه جریان گذرا).
- در مطالعات پایداری نیز از راکتانس گذرا استفاده می شود.

حالت	راکتانس ژنراتور و موتور	شرایط محاسبه	راکتانس ژنراتور	راکتانس موتور
زیرگذرا	زیر گذرا	جریان لحظه ای	زیرگذرا	زیرگذرا
گذرا	گذرا	جریان قطع	زیرگذرا	گذرا
ماندگار	سنکرون	پایداری	گذرا	گذرا

مثال: در شبکه شعاعی زیر اتصال کوتاه متقارن سه فاز در نقطه F رخ داده است. جریان عیب و ولتاژ خط را در شین ۱۱ کیلو ولت تحت شرایط وقوع عیب محاسبه کنید. توان نامی مبنا برابر ۱۰۰ مگاوات آمپر انتخاب می شود.



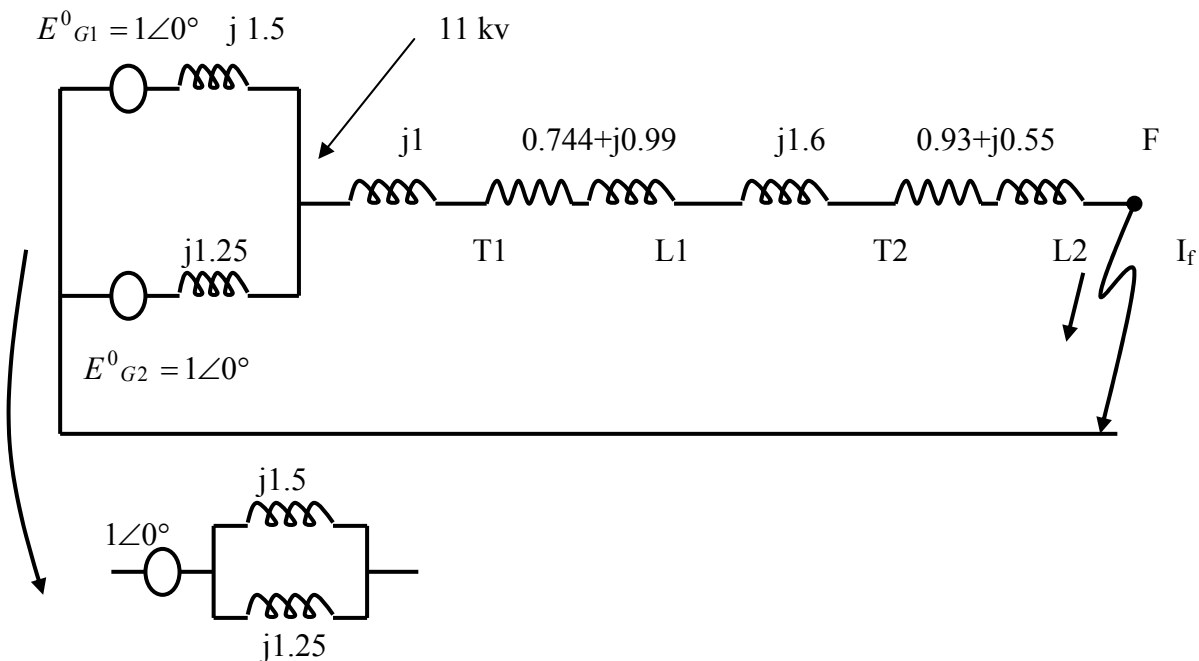
$$V_{b1} = 11 \text{ KV}, V_{b2} = 33 \text{ KV}, V_{b3} = 6.6 \text{ KV}$$

$$X_{G1} = j0.15 \times \frac{100 \text{ MVA}}{10 \text{ MVA}} = j1.5 \text{ pu} \quad X_{G2} = j0.125 \times \frac{100}{10} = j1.25 \text{ pu}$$

$$X_{T1} = j0.1 \times \frac{100}{10} = j1 \text{ pu} \quad X_{T2} = j0.08 \times \frac{100}{5} = j1.6 \text{ pu}$$

$$Z_{L1} = \frac{30 \times (0.27 + j0.36)}{(33 \text{ k})^2 / 100 \text{ M}} = 0.744 + j0.99 \text{ pu}$$

$$Z_{L2} = \frac{3 \times (0.135 + j0.08)}{(6.6 \text{ k})^2 / 100 \text{ M}} = 0.93 + j0.55 \text{ pu}$$



$$\bar{Z}_{total} = (j1.5 \parallel j1.25) + (j1) + (0.744 + j0.99) + (j1.6) + (0.93 + j0.55)$$

$$\rightarrow \bar{Z}_{total} = 1.647 + j4.82 = 5.1 \angle 70.8^\circ \text{ pu}$$

$$V_{b,3p} = \sqrt{3} V_{b,1p} \rightarrow V_{pu,L} = \frac{V_L}{V_{b,3p}} = \frac{\sqrt{3} V_p}{\sqrt{3} V_{b,1p}} = \frac{V_p}{V_{b,1p}} = V_{pu,1p}$$

$$I_{b,3p} = \frac{100 \text{ M}}{\sqrt{3} \times 6.6 \text{ K}} = 8750 \text{ A} = \frac{100 \text{ M}/3}{6.6 \text{ K}/\sqrt{3}} = I_{b,1p}$$

$$I_{b,3p} = I_{b,1p} \Rightarrow \bar{I}_{pu,L} = \bar{I}_{pu,1p} \Rightarrow \bar{I}_{pu} = \frac{S_{pu,3p}}{V_{pu,L}} = \frac{S_{pu,1p}}{V_{pu,1p}}$$

$$\bar{I}_F = \frac{1 \angle 0^\circ}{5.1 \angle 70.8^\circ} = 0.196 \angle -70.8^\circ \text{ pu}$$

$$I_F = 0.196 \times 8750 = 1715 \text{ A}$$

$$\bar{Z}_{11KV-F} = (j1) + (0.744 + j0.99) + (j1.6) + (0.93 + j0.55) = 1.674 + j4.14 = 4.47 \angle 67.98^\circ \text{ pu}$$

$$\bar{V}_{11KV-F} = \bar{Z}_{11KV-F} \times \bar{I}_F = (4.47 \angle 67.98^\circ) \times (0.196 \angle -70.8^\circ) = 0.88 \angle -2.82^\circ \text{ pu}$$

$$\bar{V}_{11KV} = 0.88 \angle -2.82^\circ \times 11KV = 9.68 \angle -2.82^\circ \text{ KV}$$

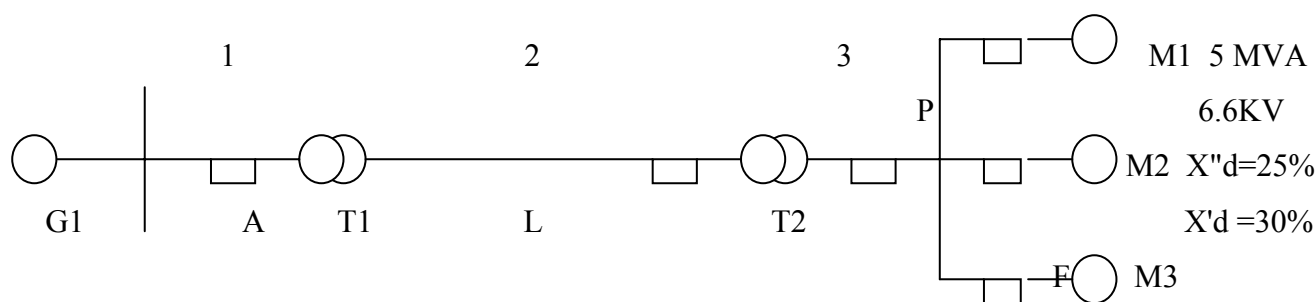
مثال : در شکل زیر ژنراتور از طریق ترانسفورماتورهای T1, T2 و خط انتقال L و موتور های M1, M2, M3 متصل شده است. قبل از وقوع عیب اتصال کوتاه سه فاز متقارن در نقطه F مقدار ولتاژ در شین موتور ها (نقطه P) برابر 6.6 KV است. با وقوع اتصال کوتاه در نقطه F مطلوب است محاسبه:

الف- جریان زیرگذرای عیب

ب- جریان زیر گذرا در کلید قدرت B

پ- جریان لحظه ای در کلید قدرت B

ت- جریان قطع به وسیله کلید قدرت B در مدت زمان پنج سیکل (محاسبه جریان گذرا)



25MVA	25MVA	$X_L=15\%$	25MVA	B
11Kv	11 / 66	درمبنای	66 / 6.6	
$X''_d=20\%$	$X=10\%$	25MVA	$X_I=10\%$	
		66 Kv		

فرض می شود که قبل از وقوع عیب سیستم در حالت بی باری بوده است (چون حالت بی باری است پس از جریان قبل از عیب صر فنظر شده است و سطح ولتاژ در تمام نقاط شبکه یکسان می باشد) قدرت مبنای سیستم را 25 MVA در نظر بگیرید.

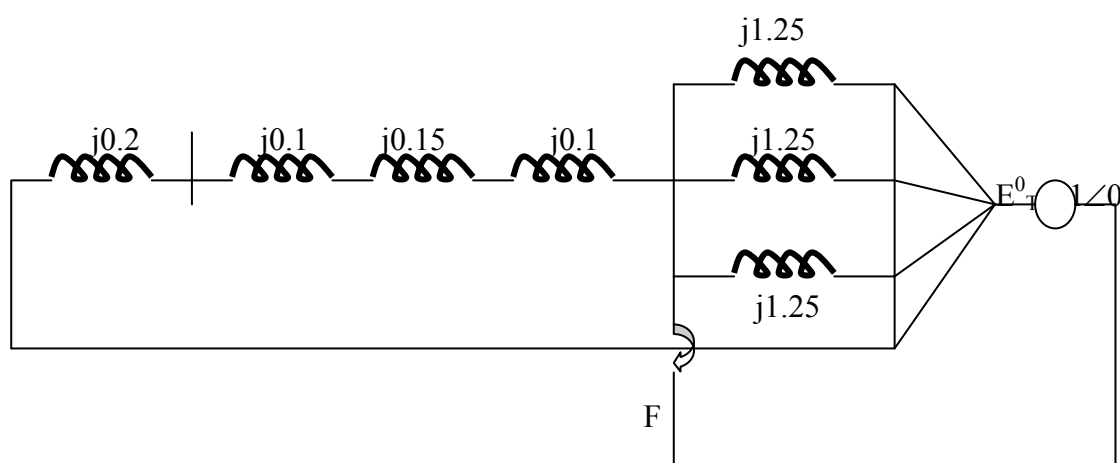
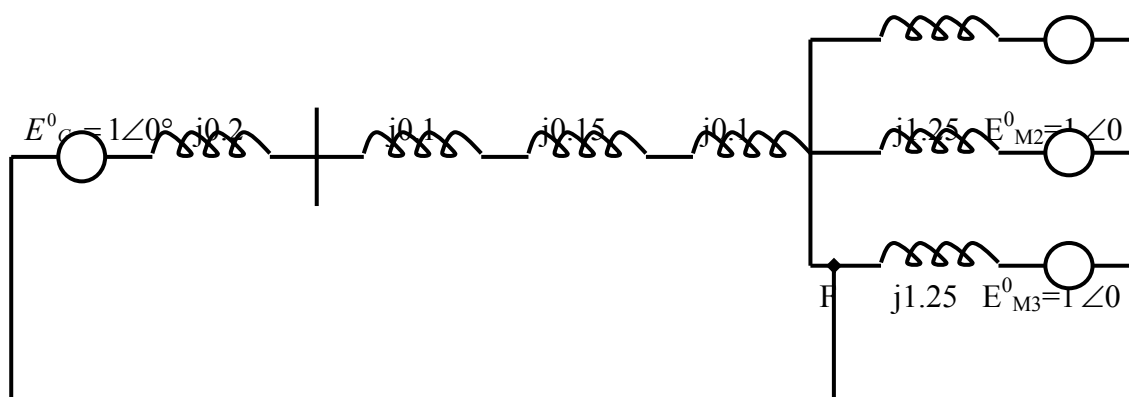
الف : برای هر موتور

$$S_{base} = 25MVA \rightarrow V_{b1} = 11Kv \rightarrow V_{b2} = 66Kv \rightarrow V_{b3} = 6.6Kv$$

$$X''_d = j0.25 \times \frac{25M}{5M} = j1.25 \text{ pu} \rightarrow X'_d = j0.3 \times \frac{25M}{5M} = j1.5 \text{ pu}$$

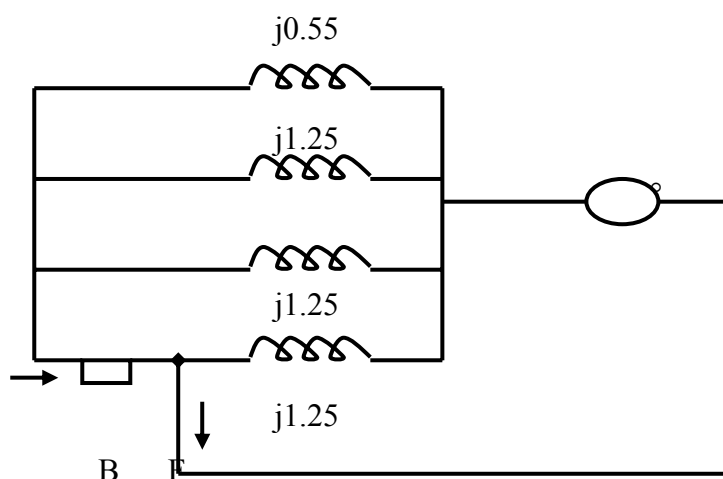
بقیه تجهیزات در مبنای صحیح می باشد مدل مداری سیستم جهت محاسبات به صورت زیر می باشد

$$j1.25 \quad 6.6/6.6Kv$$



مدار معادل تونن از دید F

بخاطر بي بار بودن مدار قبل از اتصال کوتاه امپدانس معادل از دید F با معادل منبع سري شده است در حالیکه این مسئله همیشه صحيح نبوده و در موارد بارداري مدار يك اشتباه بزرگ و نابخشودني مي باشد در حالت بارداري امپدانس معادل از دید F با ولتاژ دو سر F نسبت به زمین به عنان منبع معادل تونن سري مي شود. الف : پس از ترسیم مدار معادل تونن و خلاصه کردن آن داریم :



I_{scB} I_{sc}

مدار خلاصه شده مدار معادل تونن از دید نقطه F (برای محاسبه جریان زیرگذرا)

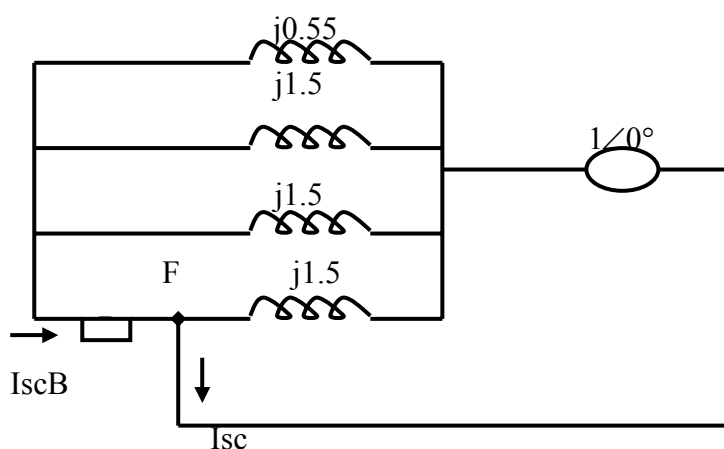
$$I_{sc} = \left(3 \times \frac{1}{j1.23} + \frac{1}{j0.55}\right) \times (1 \angle 0^\circ) = -j4.22 \text{ pu} \rightarrow$$

$$I_{base3} = \frac{25M}{\sqrt{3} \times 6.6Kv} 2187 A \rightarrow I_{sc} = -j9229 A$$

ب:

$$I_{scB} = \left(2 \times \frac{1}{j1.25} + \frac{1}{j0.55}\right) = -j3.42 \text{ pu} = -j7499.5 A$$

پ: برای یافتن جریان لحظه ای در کلید قدرت B بایستی جریان مولفه DC را به جریان زیر گذرای به دست آمده از قسمت ب اضافه کنیم علاوه بر محاسبه جریان مولفه DC می توان از روش تجربی نیز برای تاثیر این مولفه به صورت ضربی از جریان زیر گذرا استفاده کرد.



$$I_{sc,B} = 1.6 \times I_{scB} = 1.6 \times 9 - j7479.5 = -j1196 A$$

ضریب ۱/۶ در بخش بعدی بیان خواهد شد.

ت: برای محاسبه جریان کلید قدرت B با کنار گذاشتن پنج سیکل اول در آن بایستی جریان گذرای کلید قدرت B محاسبه شود پس در این حالت به جای راکتانس زیر گذرای X''_{dm} از راکتانس گذرای X'_{dm} استفاده می شود.

$$I_{sc,B} = \left(2 \times \frac{1}{j1.5} + \frac{1}{j0.55}\right) \times (1 \angle 0^\circ) = -j3.1515 \text{ pu} = -j6892 A$$

جریان گذرا

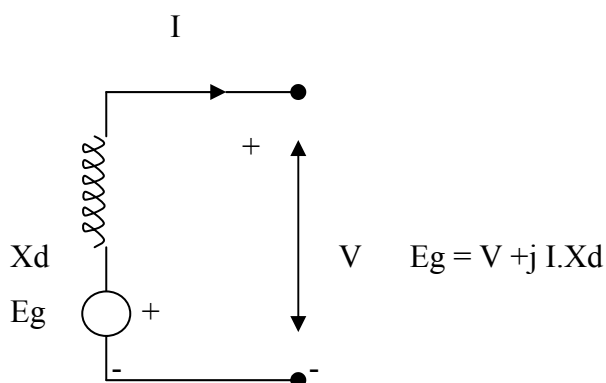
جریان قطع با مولفه DC : برای محاسبه جریان لحظه ای (momentary) کلید قدرت با احتساب جریان مولفه DC برای حالت گذرا طبق اطلاعات در بخش بعدی برای سرعت کلید قدرت در ۵ سیکل اولیه ضریب ۱,۵ در نظر گرفته شده است .

$$I_{sc,B(momentary)} = 1.1 \times (-j6892) = -j7582A$$

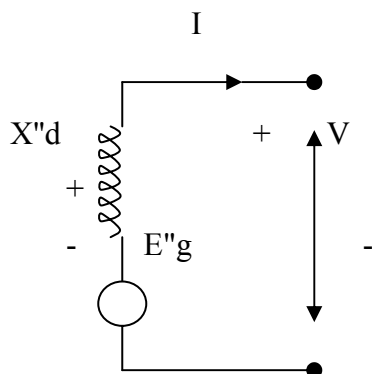
۱-۴ جریان اتصال کوتاه ماشین سنکرون باردار

بررسی اتصال کوتاه در حالت بارداری ماشین سنکرون قدری پیچیده می باشد و خارج از حوصله این درس می باشد با این حال سعی می شود در حد حوصله درس اتصال کوتاه در شرایط بارداری ماشین سنکرون تحلیل شود.

شکل زیر مدار معادل بارداری ماشین سنکرون را در شرایط ماندگار برای جریان بار و ولتاژ ترمینال نشان می دهد E_g ولتاژ القایی ژنراتور سنکرون در حالت بارداری و X_d راکتانس سنکرون محور مستقیم ماشین سنکرون است.

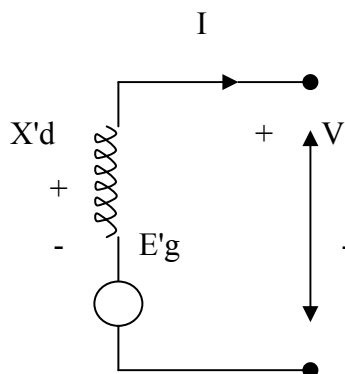


وقتی اتصال کوتاهی در دو سر ماشین سنکرون رخ می دهد مدار معادل بارداری ماشین سنکرون در حالت ماندگار تبدیل به مدار معادل بارداری ماشین سنکرون در حالت گذرا و زیر گذرا تبدیل می شود.



مدار معادل بارداری در حالت زیر گذرا

$$E''_g = V + j I X''_d$$



مدار معادل بارداری ماشین سنکرون در حالت گذرا

$$E'_g = V + j I X'_d$$

ولتاژ پشت راکتانس زیر گذرا $E''g = \text{voltage behind the subtransient reactance}$

ولتاژ پشت راکتانس گذرا $E'g = \text{voltage behind the transient reactance}$

در حالت بی باری $I = 0 \rightarrow E''g = E'g = E_g = \text{no load voltage}$

برای موتور سنکرون نیز در سه حالت ماندگار و گذرا و زیر گذرا در بارداری روابط بال صادق می باشد فقط باید به جای جمع تفریق بگذاریم

$$E''m = V - j I X''_{dm} \quad , \quad E'm = V - j I X'_{dm} \quad , \quad E_m = V - j I X_{dm}$$

بنابراین هرگاه در مورد اتصال کوتاه در یکی سیستم قدرت به هم پیوسته بحث کنیم در این صورت ماشین سنکرون (ژنراتور ها و موتور ها) با مدار معادل مربوطه به صورت ولتاژ پشت راکتانس زیر گذرا (گذرا) جایگزین می شود بقیه قسمت های سیستم نیز به صورت عناصر پسیو بدون تغییر باقی می ماند.

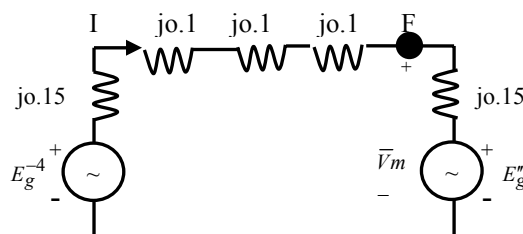
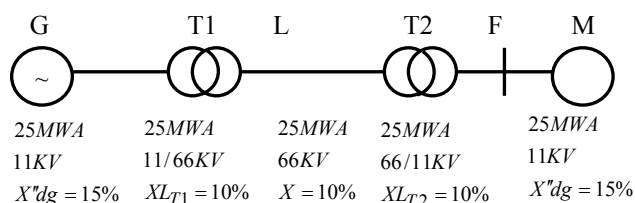
مثال- در سیستم قدرت زیر ژنراتور سنکرون G از طریق ترانسفورماتورهای T1 و T2 و خط انتقال L به موتور سنکرون M متصل شده اند. در لحظه ای اتصال کوتاه سه فاز دو سر ترمینالهای موتور سنکرون، ولتاژ ترمینالهای آن برابر ۱۰/۶ کیلو ولت و دربار ۱۵ مگاوات و ضریب قدرت ۰/۸ پیش فاز است. جریان زیرگذاری ژنراتور سنکرون، موتور سنکرون و جریان زیرگذاری عیب را محاسبه کنید. حل: تمام راکتانس ها در توان مبنا ۲۵ مگا ولت آمپر در نظر گرفته می شوند.

$$S_{base} = 25 \text{ MVA}$$

$$V_{b1} = 11 \text{ KV}$$

$$V_{b2} = 66 \text{ KV}$$

$$V_{b3} = 11 \text{ KV}$$



مدار معادل قبل از عیب

Prefault Condition:

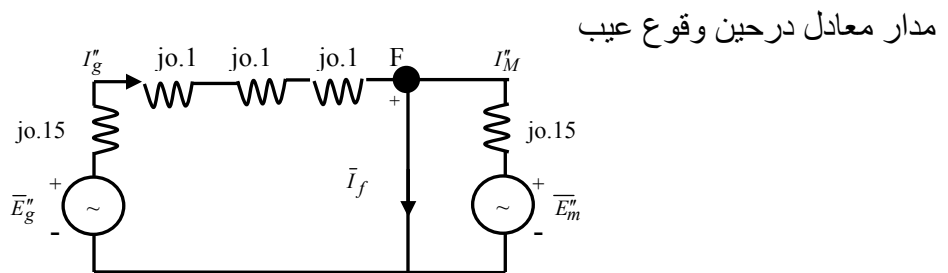
$$\text{Prefault Voltage of Motor} \rightarrow \bar{V}_m = \frac{10.6^k}{11k} = 0.9636 \angle 0^\circ \text{ Pu}$$

$$\text{Load of Motor} = 15 \text{ Mw}, 0.8 \text{ Pf Leading} \Rightarrow \frac{15M}{25M} = 0.6 \text{ Pu}, 0.8 \text{ Pu Leading}$$

$$\text{Prefault Current } \bar{I} = \frac{0.6}{0.9636 \times 0.8} \angle +36.9^\circ = \frac{S_{3p}, \text{ Pu}}{V_L, \text{ Pu}} = \frac{S_{1p}, \text{ Pu}}{V_{1p}, \text{ Pu}} = 0.7783 \angle +36.9^\circ$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Voltage behind Subtransient reactance (Generator)} \\ \bar{E}_g'' = \bar{V}_m + (j0.15 + j0.1 + j0.1 + j0.1) \times \bar{I} = 0.7536 + j0.28 \text{ Pu} = 0.8039 \angle 20.38^\circ \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Voltage behind Subtransient reactance (Motor)} \\ \bar{E}_m'' = \bar{V}_m - j0.15 \times \bar{I} = 1.0336 - j0.0933 \text{ Pu} = 1.0378 \angle -5.16^\circ \end{array} \right.$$



Under faulted Condition:

$$\bar{I}_g'' = \bar{E}_g'' / (j0.15 + j0.1 + j0.1 + j0.1) = 0.6226 - j1.6746 \text{ Pu}$$

$$\bar{I}_m'' = \bar{E}_m'' / j0.15 = -0.6226 - j6.8906 \text{ Pu}$$

$$\bar{I}_f = \bar{I}_g'' + \bar{I}_m'' = -j8.5653 \text{ Pu}$$

$$I_{base} (\text{generator} / \text{motor}) = \frac{25M}{\sqrt{3} \times 11^k} = 1312.2^A$$

$$I_g'' = 816.4 - j2197.4 \text{ A}$$

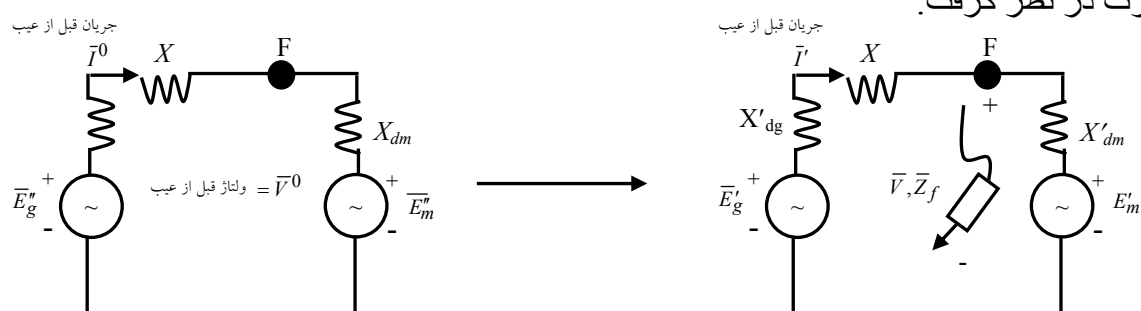
$$I_m'' = -816.2 - j9041.8 \text{ A}$$

$$I_f'' = -j11239 \text{ A}$$

۵-۱ محاسبه جریان اتصال کوتاه با استفاده از قضیه تونن

یکی از روشهای محاسبه جریان اتصال کوتاه از طریق کاربرد روش و قضیه تونن است. این روش سریعتر و راحتتر از روش محاسباتی سیستماتیک در شبکه‌های الکتریکی بزرگ است. قضیه تونن یک راه حل کلی است و اینجا از طریق بررسی یک مثال تحلیل می‌شود.

فرض کنید ژنراتور سنکرون از طریق یک خط انتقال به موتور سنکرون متصل شده است. مدل مداری این سیستم در شرایط ماندگار بصورت زیر است. فرض کنید نقطه‌ای عیب F در سر ترمینال موتور سنکرون اتفاق بیفتد. در لحظه‌ای وقوع عیب برحسب شرایط می‌توان مدل حالت گذرا یا زیرگذرا را برای مدل مولدی سیستم قدرت در نظر گرفت.



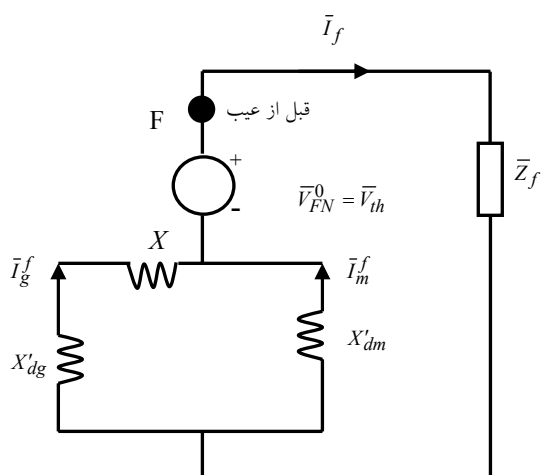
برای محاسبه جریان گذرا از مدل حالت گذرا و برای محاسبه‌ی جریان زیر گذرا از مدل حالت زیر گذرا استفاده می‌شود در اینصورت ولتاژهای پشت را کتانس گذرا و یا زیرگذرا بصورت سری باراکتانس‌های مذکور ترسیم می‌شوند.

- از دید نقطه‌ی F مدار معادل تونن بصورت زیر در می‌آید:

$$\bar{I}_f = \frac{\bar{V}_{th}}{\bar{Z}_{th} + \bar{Z}_f} \quad \text{جریان ناشی از عیب}$$

$$\bar{I}_g^f = \frac{X'_d m}{X'_d g + X + X'_d m} \bar{I}_f$$

$$\bar{I}_m^f = \frac{X'_d g + X}{X'_d g + X + X'_d m} \bar{I}_f$$



در حالت کلی نمی‌توان جریان خارج از امپدانس تونن را به داخل آن برد و توزیع کرد

جریان کل = جریان قبل از عیب + جریان ناشی از عیب

ولتاژ کل = ولتاژ قبل از عیب + ولتاژ ناشی از عیب

$$\bar{I}_g = \bar{I}^0 + \bar{I}_g^f \quad \bar{E}_g = \bar{E}_m = 1 \angle 0^\circ \text{ (فقط در حالت بی باری امکان دارد)}$$

$$\bar{I}_m = -\bar{I}^0 + \bar{I}_m^f$$

$$\bar{V} = \bar{V}_{FN} = \bar{V}_{FN}^0 + (-jX_{th}\bar{I}_f)$$

مراحل عملیات محاسبه جریان اتصال کوتاه فوق:

(۱) تحلیل حالت ماندگار سیستم در شرایط بار داری (تحلیل پخش بار)

(۲) تعویض راکتانس ماشین سنکرون باراکتانس زیرگذاري گذرا در شرایط عیب اتصال کوتاه- صفر کردن تمامی منابع و محاسبه‌ای امپدانس تونن

(۳) اتصال امپدانس تونن به نقطه (سر) منفی ولتاژ نقطه‌ای عیب (با مقدار قبل از عیب) بصورت سری و محاسبه‌ی جریانها و ولتاژهای حین عیب با اتصال مدار معادل تونن در نقطه‌ی عیب توسط امپدانس عیب

(۴) جریان و ولتاژ کل هر نقطه‌ای در سیستم از مجموع جریانها و ولتاژهای مرحله ۱ و ۳ محاسبه می‌شود.

در صورت عدم اطلاعات کافی از سیستم در شرایط قبل از عیب (ماندگار) فرایض زیر قابل انتخاب هستند:

فرض ۱: اندازه تمامی ولتاژهای قبل از عیب برابر ۱ پریونیت فرض می‌شوند

فرض ۲: تمامی جریانهای قبل از عیب برابر صفر فرض می‌شوند.

۱-۶ انتخاب کلیدهای قدرت

دو پارامترهای اصلی برای انتخاب کلید قدرت با استفاده از محاسبات اتصال کوتاه عبارتند از:

جریان لحظه‌ای نامی Rated Momentary Current

جریان قطع نامی Rated Interrupting Current

در رژیم زیرگذرا:

- برای محاسبه‌ی جریان لحظه‌ای اتصال کوتاه متقارن پاسخ سینوسی از راکتانس‌های زیرگذرا در ماشین‌های سنکرون استفاده می‌شود.

- برای محاسبه جریان لحظه‌ای اتصال کوتاه (موثر) کل با در نظر گرفتن جریان مولفه DC بایستی جریان لحظه‌ای اتصال کوتاه متقارن پاسخ سینوسی را در ضریب تجربی ۱.۶ ضرب نمائیم.

$$I_{mm} \approx 1.6 \times I_{mm} |_{X'd}$$

در رژیم گذرا:

- برای محاسبه‌ی جریان قطع اتصال کوتاه پاسخ سینوسی از راکتانس زیرگذرا برای ژنراتور سنکرون و راکتانس گذرا برای موتور سنکرون استفاده می‌شود در شرایط موتور القایی اکثراً صرفنظر می‌شود (در برخی محاسبات ممکن است شرایط موتور القایی نیز در نظر گرفته شود)
- برای محاسبه جریان قطع اتصال کوتاه کل، با در نظر گرفتن جریان مولفه‌ای DC بایستی جریان قطع اتصال کوتاه پاسخ سینوسی را با استفاده از ضرایب زیر در ضرایب مربوطه ضرب کنیم:

$$I_{intr} \approx \text{ضریب} \times I_{intr} |_{x''dg, x''dm}$$

سرعت کلید قدرت	8 سیکل یا آهسته تر	5 سیکل	3 سیکل	2 سیکل
ضریب	1	1.1	1.2	1.4

- اگر قدرت اتصال کوتاه کلید بیشتر از 500 MVA باشد، هر کدام از ضرایب فوق 0.1 افزایش می‌یابد.
- ضرایب فوق برای کلیدهای هوایی با مقدار نامی 600^V یا کمتر برابر 1.25 می‌باشد.
- در رنج مشخصی جریان قطع اتصال کوتاه کلید قدرت بطور معکوس با ولتاژ کار آن متناسب است.
- ولتاژ کار نمی‌تواند از حد ماکزیمم طراحی شده افزایش یابد و نیز جریان قطع اتصال کوتاه نیز نمی‌تواند از مقدار حداکثر جریان قطع نامی بیشتر باشد در چنین رنج‌های کاری حاصلضرب ولتاژ کار و جریان قطع ثابت است بنابراین منطقی و مناسب است که جریان نامی کلید قدرت بصورت قدرت اتصال کوتاه (SC MVA) قطع بصورت زیر بیان شود:

Rated interrupting MVA (three-phase) Capacity

$$= \sqrt{3} V_{L, \text{rated}}^{(KV)} \times I_{L, \text{rated interrupting}} (KA)$$

- بنابراین بجای محاسبه جریان اتصال کوتاه قطع، مقدار قدرت اتصال کوتاه SC MVA سه فاز وقفه محاسبه می‌گردد:

$$SC \text{ MVA (3-phase)} = \sqrt{3} \times \text{Prefault Line Voltage (KV)} \times SC \text{ Current (KA)}$$

- اگر جریان و ولتاژ در پایه مقادیر سه فاز بصورت پریونیت باشند:

$$SC \text{ MVA (3-phase)} = V_{\text{prefault}} \times I_{sc} \times (MVA)_{\text{base}}$$

- واضح است که مقدار MVA نامی قطع در يك کلید قدرت بیشتر (یا برابر) از SC MVA لازم برای وجود قطع است.

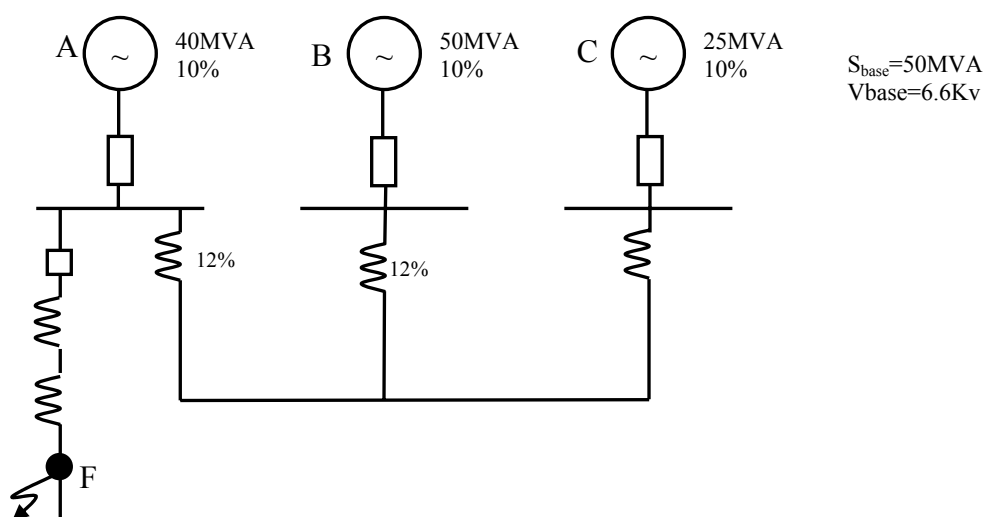
برای انتخاب کلید قدرت در یک منطقه ابتدا لازم است مقدار SC MVA حداکثر ممکن قطع را با در نظر گرفتن نوع و محل عیب و مقدار ظرفیت تولید انرژی (ژنراتور سنکرون و حتی برای کار موتوری سنکرون) تجهیزات متصل به سیستم قدرت محاسبه شود.

توجه: عیب اتصال کوتاه سه فاز معمولاً دارای بیشترین مقدار SC MVA است و کلید قدرت بایستی توانایی تحمل و قطع (Interrupting) آنرا داشته باشد. در یک حالت استثنا عیب اتصال کوتاه تکفاز به زمین LG در نزدیکی ترمینال ژنراتور سنکرون خطرناکتر از عیب اتصال کوتاه سه فاز بوده و جریان آن بیشتر است. در یک سیستم قدرت ساده حداکثر مقدار SC MVA در محل عیب مشخص است. اما در سیستمهای قدرت بزرگ برای یافتن حداکثر مقدار SC MVA بایستی محاسبات اتصال کوتاه در محل های ممکن و مختلف انجام گیرد.

مثال) سه ژنراتور ۶/۶ کیلو ولتی A, B, C باراکتانس نشستی ۱۰٪ و مقدار MVA نامی 25, 50, 40 بصورت شکل زیر بهم متصل شده اند. ترمینال هر یک از ژنراتورها از طریق راکتانس محدود کننده باراکتانس ۱۲٪ بر اساس مقادیر نامی هر یک از ژنراتورها به شبکه متصل شده اند. یک خط تغذیه سه فاز با ولتاژ ۶/۶ کیلو ولت از ژنراتور A گرفته شده است.

امپدانس خط تغذیه برابر $j0.06 + j0.12$ اهم بر فاز است. مقدار حداکثر MVA که خط تغذیه در اتصال کوتاه متقارن و در انتهای خود میتواند تحمل کند را محاسبه کنید.

فرض: قبل از وقوع عیب شبکه در حالت بی باری است (جریان بی باری برابر صفر می باشد)



$$\bar{Z}_{feeder} = \frac{0.06 + j0.12}{(6.6k)^2 / 50M} = 0.069 + j0.138 \text{ Pu}$$

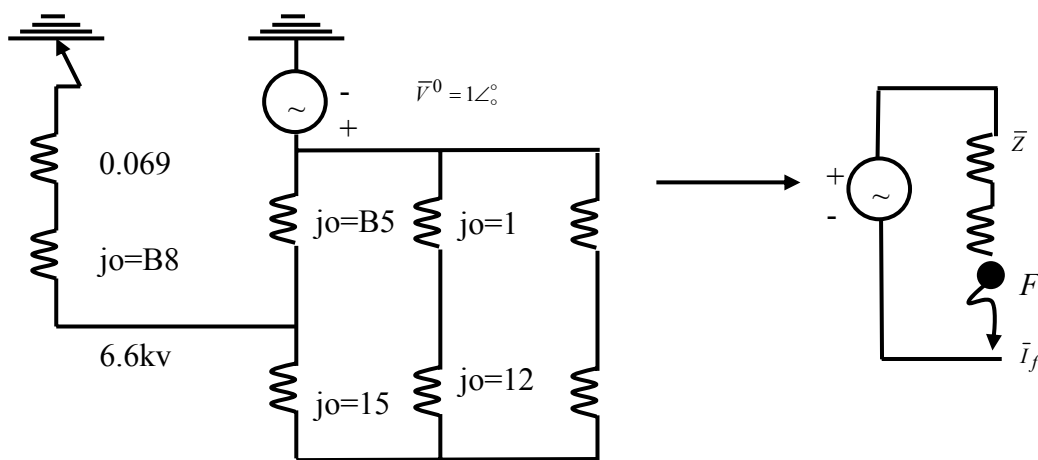
$$\text{Generator: } X_{G,A} = j0.1 \times \frac{50M}{40M} = j0.125 \text{ Pu}, X_{G,B} = j0.1 \text{ Pu}, X_{G,C} =$$

$$j0.1 \times \frac{50M}{25M} = j0.2 \text{ Pu}$$

$$\text{Reactor: } X_{R,A} = j0.12 \times \frac{50M}{40M} = j0.15 \text{ Pu}, X_{R,B} = j0.12 \text{ Pu}, X_{R,C} =$$

$$j0.12 \times \frac{50M}{25M} = j0.24 \text{ Pu}$$

به علت بي بار بودن قبل از وقوع عيب:



$$\bar{Z} = (0.069 + j0.138) + [j0.125 \parallel (j0.15 + j0.22 \parallel j0.44)]$$

$$= 0.069 + j0.226 = 0.236 \angle 73^\circ \text{ Pu}$$

$$\bar{S}_{sc} = \bar{V}^0 \bar{I}_f^* = \bar{V}^0 \left(\frac{\bar{V}^0}{\bar{Z}} \right)^* = \frac{\bar{V}^{02}}{\bar{Z}^*} = \frac{1}{\bar{Z}^*}$$

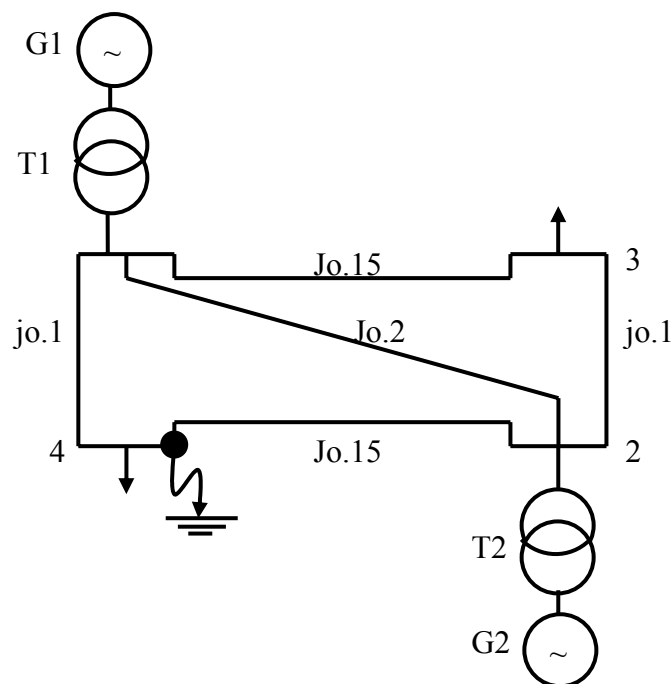
$$\bar{S}_{sc}, \text{Pu} = \frac{1}{\bar{Z}^*} \times S_{base} = \frac{1}{0.236 \angle -73^\circ} \times 50M = 0.212 \angle 73^\circ \text{ MVA}$$

مثال: شبکه‌ی ۴ شینه‌ی زیر را در نظر بگیرید شین‌های ۱ و ۲ تولید و شین‌های ۳ و ۴ شین‌های بار هستند مقادیر نامی ژنراتورها 100MVA ، 11kv و راکتانس گذرای ۱۰% می‌باشند. دو عدد ترانسفورماتور 100MVA ، 11/110kv باراکتانس نشتی 5% ، ژنراتورها را به شین‌های مربوط وصل نموده‌اند. راکتانس خطوط در مقادیر نامی 100MVA و 110kv طبق شکل داده شده‌اند.

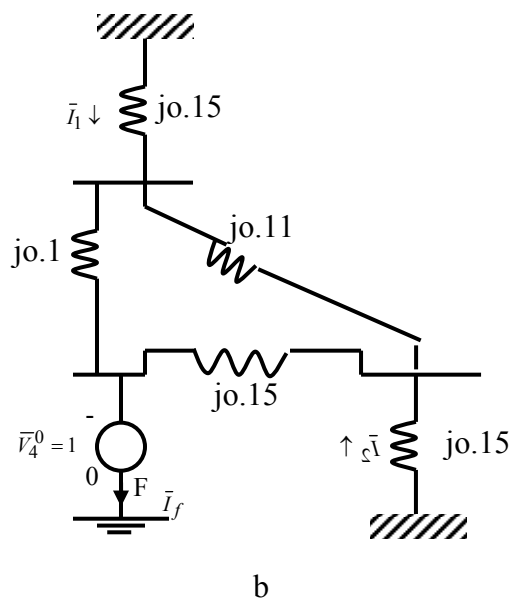
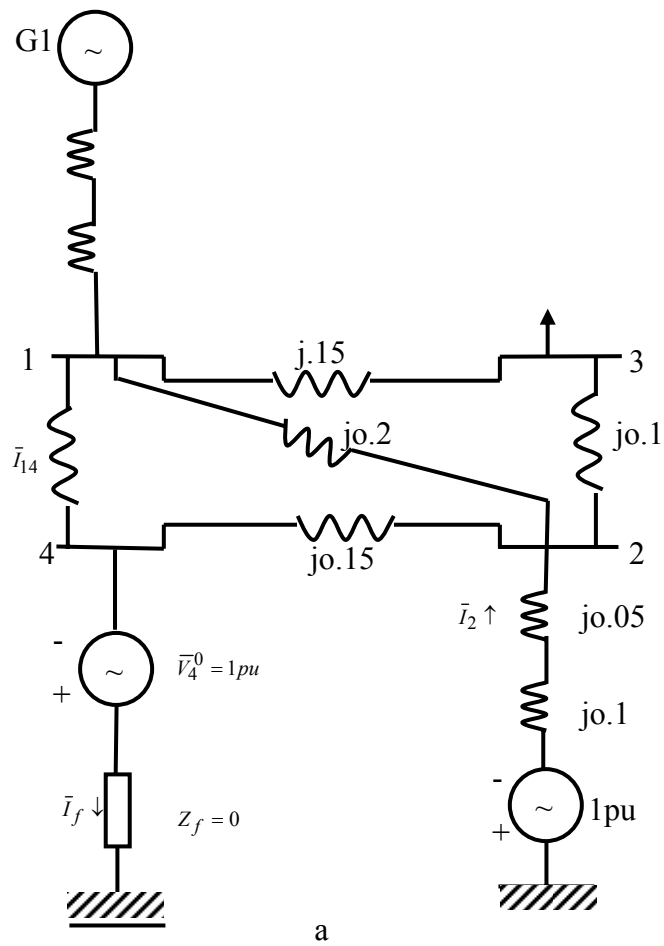
جریان اتصال کوتاه سه فاز متقارن را بدون امپدانس عیب در شین بار ۴ محاسبه کنید.

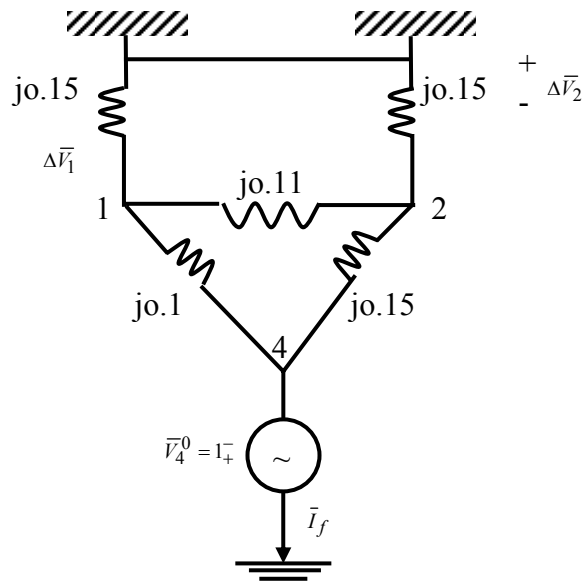
فرض کنید ولتاژها و جریان‌های قبل از عیب به ترتیب 0,1 پریونیت می‌باشند.

$$V_{base}=11kv \text{ و } S_{base} = 100MVA$$

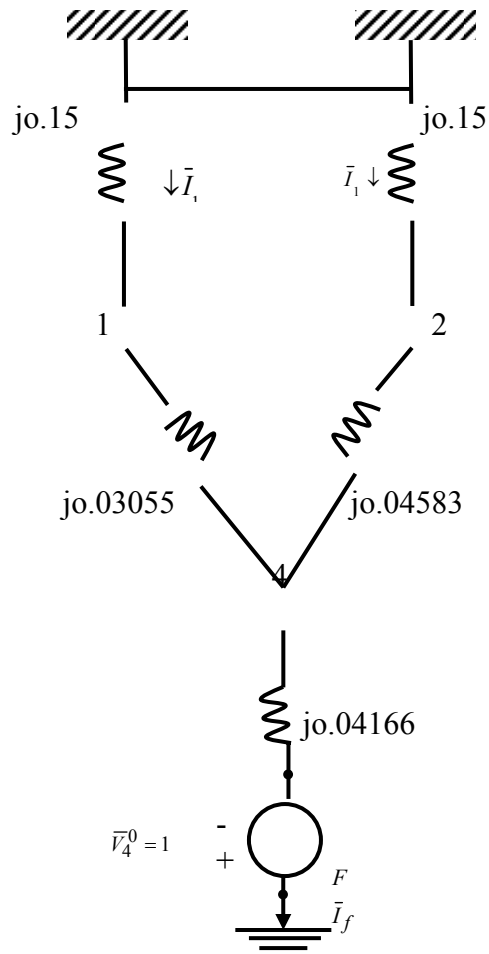


مدار معادل تونن را از دید نقطه عیب ترسیم می‌کنیم:

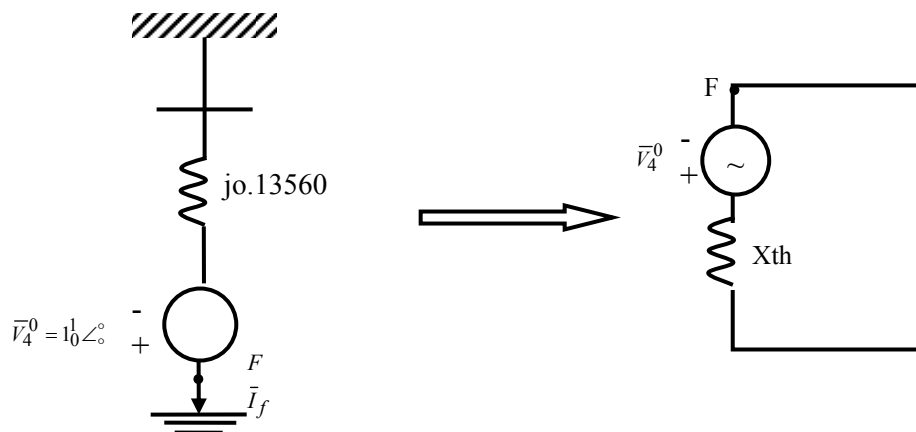
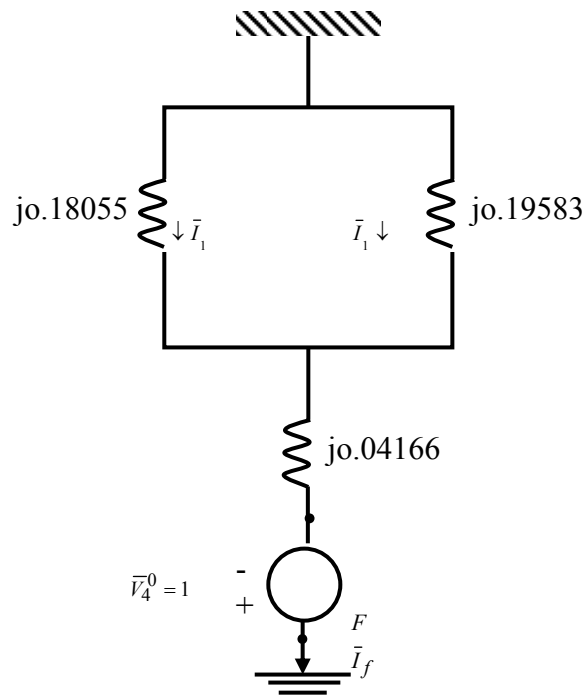




(c)



(d)



$$\bar{I}_F = \frac{1\angle 0^\circ}{j0.13560} = -j7.37463 \text{ Pu (f) از شکل}$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_f \times \frac{j0.19583}{j0.37638} = -j3.83701 \text{ Pu (e) از شکل}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_f \times \frac{j0.18055}{j0.37638} = -j3.53762 \text{ Pu}$$

تغییرات ولتاژ در شین‌های ۱، ۲، ۳: (از شکل (c))

$$\Delta \bar{V}_1 = \bar{I}_1 \times j0.15 = 0.57555 \text{ Pu}$$

$$\Delta \bar{V}_2 = \bar{I}_2 \times j0.15 = 0.53064 \text{ Pu}$$

$$\bar{V}_1^f = \bar{V}_1^0 - \Delta \bar{V}_1 = 1 \angle 0^\circ - 0.57555 = 0.42445 \text{ Pu}$$

$$\bar{V}_2^f = \bar{V}_2^0 - \Delta \bar{V}_2 = 1 \angle 0^\circ - 0.53064 = 0.46936 \text{ Pu}$$

شکل (a)

$$\bar{I}_{13} = (\bar{V}_1^f - \bar{V}_2^f) / (j0.15 + j0.1) = j0.17964 \text{ Pu}$$

$$\Delta \bar{V}_3 = \Delta \bar{V}_1 + \Delta \bar{V}_{13} = \bar{I}_1 \times j0.15 + \bar{I}_{13} \times j0.15 = 0.54860 \text{ Pu}$$

$$\bar{V}_3^f = \bar{V}_3^0 - \Delta \bar{V}_3 = 1 \angle 0^\circ - 0.54860 = 0.4514 \text{ Pu}$$

$$\bar{V}_4^f = \bar{I}_f \bar{Z}_f = 0 \text{ Pu}, \quad \bar{V}_4^f = \bar{V}_4^0 - \Delta \bar{V}_4 = 1 \angle 0^\circ - 1 \angle 0^\circ = 0 \text{ Pu}$$

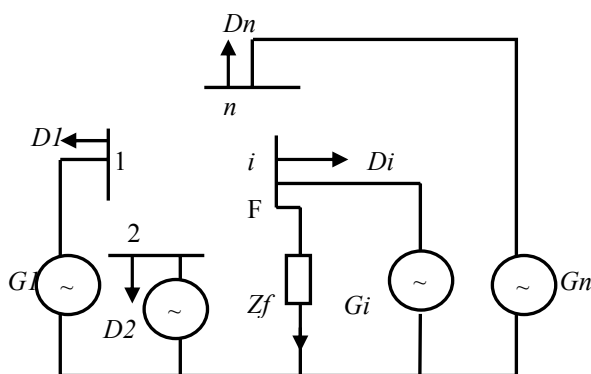
$$\bar{S}_{sc,4} = \bar{V}_4^0 \bar{I}_f^* = (1 \angle 0^\circ)(-j7.37463) \times (100 \text{ MVA}) = -j737.463 \text{ MVA}$$

۷-۱ الگوریتم محاسبات اتصال کوتاه متقارن

مطالعه اتصال کوتاه (متقارن و غیر متقارن) در شبکه‌های ساده با عناصر پسیو ساده می‌باشند اما برای سیستم‌های با ابعاد متوسط و بزرگ بایستی از روش‌های الگوریتمیک و کلی برای محاسبات اتصال کوتاه استفاده نمود که بر پایه محاسبات کامپیوتری استوار می‌باشند. این کار در ۴ مرحله انجام می‌شود. فرض می‌کنیم یک شبکه n شینه در حالت ماندگار (یا بار پایدار) بصورت زیر موجود باشد:

مرحله ۱- محاسبه ولتاژهای تمام شین‌ها و جریان‌های تمام خطوط قبل از عیب (Prefault) با استفاده از

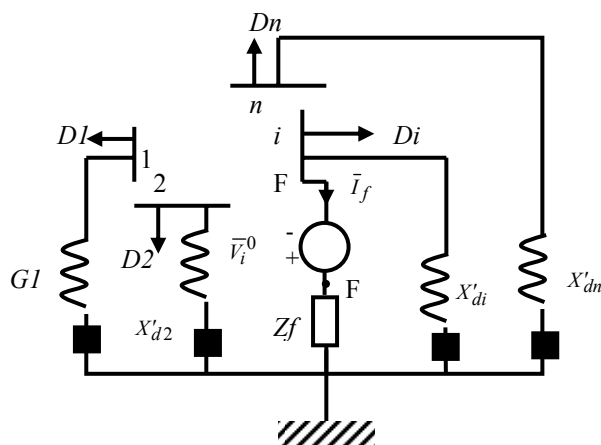
$$\bar{V}_{bus}^0 = [\bar{V}_1^0 \bar{V}_2^0 \dots \bar{V}_n^0]^T \quad \text{مطالعات پخش بار:}$$



فرض می‌شود شین i از طریق امپدانس عیب \bar{Z}_f اتصال کوتاه شود در اینصورت بردار ولتاژ حین عیب (پس از عیب Post fault) برابر است با:

بردار تغییرات ولتاژ شین‌ها ناشی از وقوع عیب: $\bar{V}_{bus}^f = \bar{V}_{bus}^0 + \Delta \bar{V}_{bus}^f$

ماتریس امپدانس شین‌ها $\bar{Y}_{bus}^{-1} = \bar{Z}_{bus}$



مرحله ۲- ترسیم مدار معادل تونن پسپو شبکه قدرت که در آن ژنراتورها توسط راکتانس‌های گذرا زیرگذرا با مقدار emf اتصال کوتاه شده جایگزین می‌شوند.

مرحله ۳- اتصال مدار معادل تونن پسپو شبکه قدرت، از شین i با $(-\bar{V}_i^0)$ بصورت سری با \bar{Z}_f به زمین. در اینصورت ولتاژهای این شبکه توسط $\Delta \bar{V}_{bus}^f$ محاسبه می‌شود:

$$\Delta \bar{V}_{bus}^f = \bar{Z}_{bus} \cdot \bar{I}^f$$

$$\bar{I}^f = \text{bus Current injection network} = [\approx 0 \approx 0 \dots \bar{I}_i^f = -\bar{I}_f \dots \approx 0]^T$$

شبکه فقط بوسیله جریان $(-\bar{I}_f)$ در شین i تزریق شده است و از جریان بار شین‌ها نیز صرف‌نظر شده است،

$$\bar{Z}_{bus} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{11} & \dots & \bar{Z}_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ \bar{Z}_{n1} & \dots & \bar{Z}_{nn} \end{bmatrix} = \text{bus impedance matrix of the Passive thevenin network}$$

$$\Delta \bar{V}_i^f = \bar{Z}_{ii} \bar{I}_i^f = -\bar{Z}_{ii} \bar{I}_f \quad \text{پس:}$$

مرحله ۴- بنابراین ولتاژ شین i در حین عیب برابر است با:

$$\bar{V}_i^f = \bar{Z}_f \bar{I}_f \quad \text{این مقدار بایستی برابر باشد با: } \bar{V}_i^f = \bar{V}_i^0 + \Delta \bar{V}_i^f = \bar{V}_i^0 - \bar{Z}_{ii} \bar{I}_f$$

$$\bar{Z}_f \bar{I}_f = \bar{V}_i^0 - \bar{Z}_{ii} \bar{I}_f \rightarrow \bar{I}_f = \bar{V}_i^0 / (\bar{Z}_{ii} + \bar{Z}_f) \quad \text{پس داریم:}$$

$$\bar{V}_i^f = \frac{\bar{Z}_f}{\bar{Z}_{ii} + \bar{Z}_f} \bar{V}_i^0$$

در اینصورت اختلاف ولتاژ در شین ز ام با استفاده از روابط (1) و (2) صفحه قبل برابر با:

$$\Delta \bar{V}_j^f = \bar{Z}_{ji} \bar{I}_i^f = -\bar{Z}_{ji} \bar{I}_f$$

$$\bar{V}_j^f = \bar{V}_j^0 + \Delta \bar{V}_j^f = \bar{V}_j^0 - \bar{Z}_{ji} \bar{I}_f, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

حال مي توان جريانهاي عيب را در تمام خطوط انتقال شبکه بدست آورد:

$$\bar{I}_{ij} = \bar{Y}_{i,j} (\bar{V}_i^f - \bar{V}_j^f)$$

متفاوت از درايه i, j ماتريس y_{bus} و $\bar{y}_{i,j} = \text{admittance of the } (i,j)\text{th line}$

مثال- شبکه مثال قبل را از طريق روش کلی و الگوريتمیک حل کنید.

۸-۱ محاسبه مستقيم ماتريس امپدانس شين ها