



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی برق

بررسی حالات گذرا در سیستم‌های قدرت

دکتر سید محمد تقی بطحایی

(دانشیار و عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی)

بخش یکم - بررسی حالت‌های گذرای الکترو مغناطیسی در شبکه‌ها

فصل اول - ولتاژهای ناشی از بستن کلیدها در شبکه (Closing)

- تبدیل لاپلاس
- برژرون (مدل گسسته)
- بیولی (نرده‌بانی)
- تبدیل Z
- تبدیل فوریه
- کانولوشن
- الف - خط بدون تلفات و تکفاز
- ب - خط با تلفات و تکفاز
- ج - خطوط چند فازه با در نظر گرفتن سیم‌های گارد و اثر زمین

فصل دوم - اضافه ولتاژهای ناشی از باز کردن کلیدها در شبکه (Opening)

- قطع جریان مغناطیسی در سیم پیچ‌های با هسته آهنی (ترانسفورماتورها- راکتورها - موتورها)
- قطع جریان خازنی یا خطوط بی‌بار یا کابل‌های بی‌بار
- جریان هجومی ترانسفورماتورها

فصل سوم - صاعقه و اضافه ولتاژ ناشی از آن

فصل چهارم - اضافه ولتاژهای تحت فرکانس شبکه

بخش دوم - بررسی حالت گذرا در پست‌ها

- الف - بررسی حالت گذرا در سیم پیچ‌های ترانسفورماتور در مقابل امواج ورودی به آن (شامل پله، ضربه و ...)
- ب - بررسی حالت گذرا در سیم پیچ‌های راکتورها در مقابل امواج ورودی به آن (شامل پله، ضربه و ...)
- ج - برقگیرها و مشخصات آن برای حفاظت پست

بخش سوم - بررسی حالت گذرا در نیروگاه‌ها

الف - بررسی حالت گذرا در سیم‌پیچ‌های مولدها ناشی از:

1- کلید بین ژنراتور و ترانسفورماتور

2- ورود اضافه ولتاژ به مولد

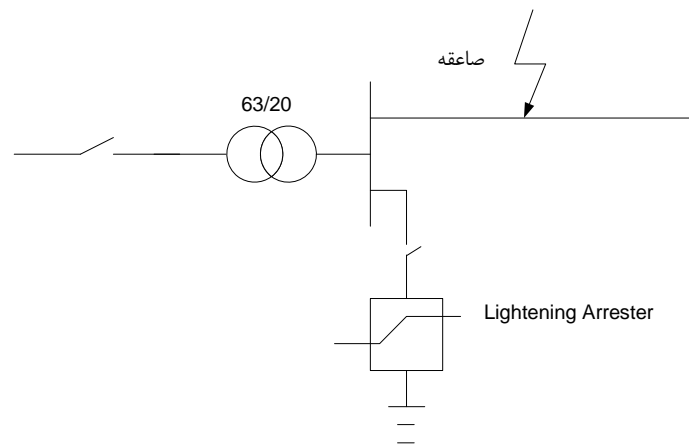
ب - بررسی حالت گذرا در سیم‌پیچ‌های موتورهای فشار قوی نیروگاه

بخش چهارم- حفاظت شبکه و پست‌ها و نیروگاه‌ها در مقابل اضافه ولتاژها

بخش پنجم- مدلسازی قوس در کلیدهای قدرت و اثر آن در مطالعات حالت گذرا

طراحی و ساخت انواع کلیدها (Air Blast, Min Oil, SF₆ , Vacuum)

پروژه: شبکه زیر مفروض است:



شکل (1)

در حالی که پست 63/20 kV ، یک خط 20 کیلوولت را تغذیه می نماید، صاعقه ای به وسط خط برخورد می کند ، مطلوب است محاسبه اضافه ولتاژ در ابتدا و انتهای خط در دو حالت زیر:

الف - کلید برقگیر بسته است

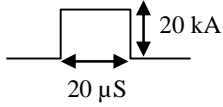
ب - کلید برقگیر باز است

مشخصات اجزاء شبکه به شرح زیر است:

1- ترانسفورماتور : $S_n=1400 \text{ KVA}$, $V_1/V_2 = 63/20$, $BIL=200 \text{ kV}$, ظرفیت خازنی ترانسفورماتور

$$C_{\text{eff}}=10^5 \mu\text{F}$$

2- خط انتقال $V = 300 \text{ km/S}$ $Z_c = 300 \Omega$, $Z=0.04 \Omega/\text{km}$, $l=20 \text{ km}$, $V=20 \text{ kv}$



3- صاعقه یک موج جریان با دامنه 20kA با زمان تداوم 20μs است.

$$R_{\text{Arres}} = \begin{cases} 10^4 \Omega & ; V < 55 \text{ kV} \\ 0.04 \Omega & ; V > 55 \text{ kV} \end{cases}$$

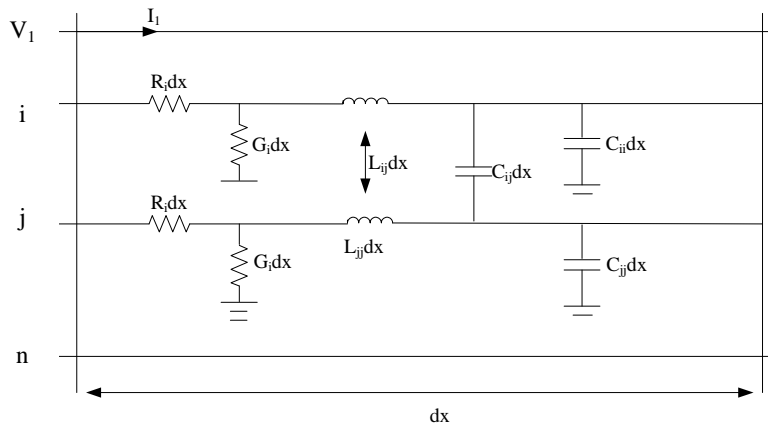
4- برقگیر مقاومت غیر خطی به صورت روبرو است:

تکلیف 1: حل پروژه توسط نرم افزار EMTP:

پروژه فوق را براساس دستورالعمل ضمیمه توسط نرم افزار ATP (EMTP) شبیه سازی کنید. بعداً در مورد این نرم افزار و نوشتن نرم افزار مشابه آن بحث خواهد شد.

بررسی مدل خط انتقال در حالت گذرا

معادلات دیفرانسیل پاره ای در حالت گذرا حاکم بر ولتاژ و جریان بر المان dx ، تعداد n هادی در بالای سطح زمین بر حسب پارمترهای خط شامل مقاومت اهمی R_c و کندوکتانس G_i و اندوکتانس خودی L_{ii} و اندوکتانس متقابل L_{ij} و کاپاسیتانس بین هادی و زمین C_{ii} و بین هادی ها G_{ij} ، مطابق شکل زیر:



شکل (2)

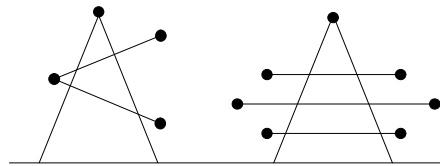
$$\begin{cases} \frac{\partial V(x,s)}{\partial x} = -\underline{Zi} \\ \frac{\partial i(x,s)}{\partial x} = -\underline{YV} \end{cases} \quad \underline{V} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad \underline{i} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix}$$

$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & \dots & Z_{1n} \\ & Z_{ij} & & & \\ & & & & \\ Z_{n1} & \dots & \dots & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad \underline{Y} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & \dots & Y_{1n} \\ & Y_{ij} & & & \\ & & & & \\ Y_{n1} & \dots & \dots & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix}$$

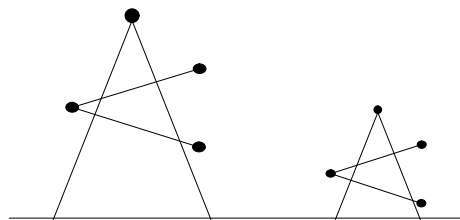
$$Z_{ij} = \delta_{ij} R_i + S L_{ij} \begin{cases} i=j; \delta_{ij}=1 \\ i \neq j; \delta_{ij}=0 \end{cases} \quad Y_{ij} = \begin{cases} -C_{ij} S & ; i \neq j \\ G_i + \sum_{m=1}^n C_{im} S & ; i=j \end{cases}$$

چرا تحلیل چند فازه مطرح است:

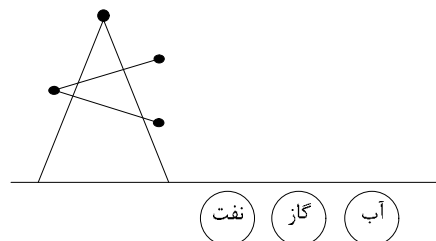
1- مطالعات حالت گذرای خط سه فاز تک مداره و دو مداره:



2- مطالعات یک خط در مجاورت یک خط دیگر



3- مطالعه حالت گذرای خطوط روی لوله‌های نفت و گاز در کریدورهای انرژی



توجه کنید سطح زمین هم به صورت تعدادی هادی است به موازات هادی‌های اصلی (قضیه کارسون)

4- مطالعه حالت گذرا در کابل‌ها

5- مطالعه حالت گذرا در ترانسفورماتورها و مولدها (موتورها و ژنراتورها)

توجه کنید اثر سیم‌گارد و زمین را می‌توان در ماتریس امپدانس \underline{Z} و ادمیتانس \underline{Y} ، منظور کرد. اثر سیم‌گارد در ماتریس \underline{Z} و \underline{Y} معادلات حاکم بر خط

$$\begin{cases} \frac{d\underline{V}(x,s)}{dx} = -\underline{Z} \underline{I} \\ \frac{d\underline{I}(x,s)}{dx} = -\underline{Y} \underline{V} \end{cases}$$

$$\underline{V} = \begin{matrix} \nearrow \text{هادی} \\ \begin{bmatrix} V_c \\ V_e \end{bmatrix} \\ \nwarrow \text{زمین} \end{matrix} \quad \underline{I} = \begin{bmatrix} I_c \\ I_e \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} V_c \\ V_e \end{bmatrix} = - \left[\begin{array}{c|c} Z_{cc} & Z_{ce} \\ \hline Z_{ce}^t & Z_{ee} \end{array} \right] \begin{bmatrix} I_c \\ I_e \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} I_c \\ I_e \end{bmatrix} = - \left[\begin{array}{c|c} Y_{cc} & Y_{ce} \\ \hline Y_{ce}^t & Y_{ee} \end{array} \right] \begin{bmatrix} V_c \\ V_e \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{اگر سیم زمین ولتاژ نداشته باشد، از رابطه اول، بنابراین} \begin{cases} V_e = 0 \\ \frac{dV_e}{dx} = 0 \end{cases}$$

از رابطه دوم I_e به دست می‌آید:

$$(1) \Rightarrow \begin{cases} \frac{dV_c}{dx} = -[Z_{cc}I_c + Z_{ce} I_e] \\ 0 = Z_{ce}^t I_c + Z_{ee} I_e \quad I_e = -Z_{ee}^{-1} Z_{ce}^t I_c \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV_c}{dx} = \left[Z_{cc} - \underbrace{Z_{ce} Z_{ee}^{-1} Z_{ce}^t}_{Z_{new}} \right] I_c \quad (1') \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_c}{dx} = -Y_{new} V_c = -Y_{cc} V_c \quad (2') \end{array} \right.$$

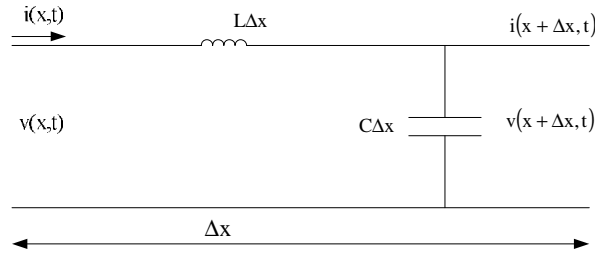
ادمیتانس سیم زمین در محاسبات اثر ندارد چون خودش به زمین وصل است (خازن‌ها اتصال کوتاه شده)

تکلیف 1-2: چگونه اثر زمین را در معادلات ولتاژ جریان خط حذف می‌کنیم.

تکلیف 1-3: مزایا و معایب سیم گارد در شبکه‌های قدرت را بررسی کنید.

جلسه دوم

معادلات ولتاژ و جریان دو خط انتقال تک فاز بدون تلفات و حل آن وقتی آن را برقرار می‌نمائیم. یک خط تکفاز دو سیمه بدون تلفات مطابق شکل زیر برای المان Δx آن در نظر بگیرید



توجه کنید در مطالعات حالت گذرا، مبدا را ابتدای خط در نظر می‌گیرند.

با توجه به قوانین جریان و ولتاژ داریم:

$$\begin{cases} v(x+\Delta x, t) - v(x, t) = -L\Delta x \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} & (1) \\ i(x+\Delta x, t) - i(x, t) = -C\Delta x \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} & (2) \end{cases}$$

طرفین روابط (1) و (2) را بر Δx تقسیم و حد آن را وقتی Δx به سمت صفر سیر می‌کند بدست می‌آوریم:

$$\begin{cases} \frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = -L \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} & (3) \\ \frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = -C \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} & (4) \end{cases}$$

چنانچه از روابط (3) و (4) لاپلاس بگیریم (شرایط اولیه صفر) داریم:

$$\begin{cases} \frac{dV(x, S)}{dx} = -SLI(x, S) & (5) \\ \frac{dI(x, S)}{dx} = -SCV(x, S) & (6) \end{cases}$$

با مشتق‌گیری از (5) نسبت به x و استفاده از رابطه (6) جهت حذف $I(x,S)$ داریم:

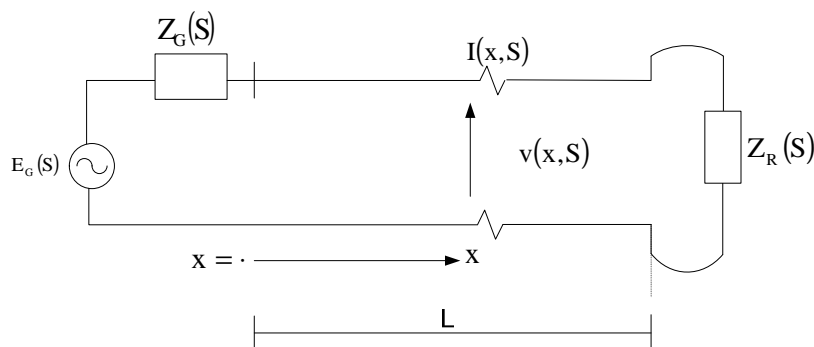
$$\frac{d^2V(x,S)}{dx^2} = -SL \frac{dI(x,S)}{dx} = S^2LCV(x,S)$$

$$\frac{d^2V(x,S)}{dx^2} - S^2LCV(x,S) = 0 \quad (7)$$

به همین ترتیب با مشتق‌گیری از رابطه (6) نسبت به x و حذف $V(x,S)$ با استفاده از رابطه (5) داریم:

$$\frac{d^2I(x,S)}{dx^2} - S^2LCI(x,S) = 0 \quad (8)$$

- حل معادلات ولتاژ (7) و جریان (8) در یک خط تک‌فاز با توجه به شرایط مرزی برقرار کردن ابتدای آن و شرایط مرزی انتهای خط شکل زیر را در نظر بگیرید. یک خط تک‌فاز دو سیمه بدون تلفات که متصل به یک بار با امپدانس $Z_R(S)$ در آخر خطا می‌باشد و با یک منبع با ولتاژ داخلی $E_G(S)$ و امپدانس سری $E_G(S)$ در ابتدای خط آن را برقرار می‌کنیم را مشاهده می‌نمائید.



$$\text{مشخصات خط: } v = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

هدف به دست آوردن ولتاژ و جریان در حالت گذرا در هر نقطه خط است. می‌خواهیم براساس این شرایط مرزی ولتاژ $V(x,S)$ و جریان $I(x,S)$ در هر نقطه خط در زمان خاص را به دست آوریم.

$$\text{شرایط مرزی در انتهای خط: } V(L,S) = Z_R(S)I(L,S)$$

$$\text{شرایط مرزی در ابتدای خط: } V(0,S) = E_G(S) - Z_G(S)I(0,S)$$

حل معادلات (7) و (8) با توجه به شرایط مرزی فوق عبارت است از:

$$V(x,s) = E_G(s) \left[\frac{Z_c}{Z_G(s) + Z_c} \right] \left[\frac{e^{-sx/v} + \Gamma_R(s) e^{s(\frac{x}{v} - 2\tau)}}{1 - \Gamma_R(s) \Gamma_S(s) e^{-2s\tau}} \right] \quad (9)$$

$$I(x,s) = \left[\frac{E_G(s)}{Z_G(s) + Z_c} \right] \left[\frac{e^{-sx/v} + \Gamma_R(s) e^{s(\frac{x}{v} - 2\tau)}}{1 - \Gamma_R(s) \Gamma_S(s) e^{-2s\tau}} \right] \quad (10)$$

که در آن:

$$\Gamma_R(s) = \frac{Z_R(s) - Z_c}{Z_R(s) + Z_c} \text{ ضریب انعکاس آخر خط}$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\Omega) \text{ امپدانس مشخصه خط}$$

$$\Gamma_S(s) = \frac{Z_G(s) - Z_c}{Z_G(s) + Z_c} \text{ ضریب انعکاس اول خط}$$

$$C = \frac{L}{v} \text{ زمان انتشار sec}$$

$$v = \sqrt{\frac{1}{LC}} \text{ سرعت انتشار}$$

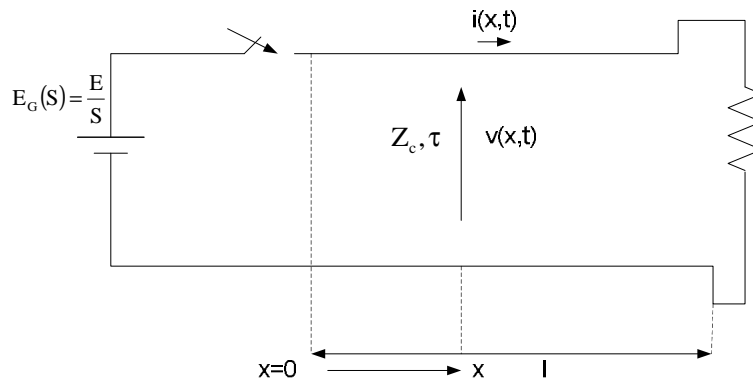
تکلیف: روابط (9) و (10) را اثبات کنید (مرجع فصل 11 کتاب Glover)

مثال 1: شکل زیر را در نظر بگیرید. برقرار کردن یک خط توسط یک منبع چنانچه $Z_R = Z_C$ و

$Z_C(s) = 0$ و منبع ولتاژ به صورت پله $e_G(t) = E u_{-1}(t)$ باشد، مطلوب است:

1- تعیین مقدار $i(x,t)$ ، $v(x,t)$

2- رسم منحنی ولتاژ و جریان بر حسب زمان در وسط خط



$$I_R(s) = \frac{Z_R(s) - Z_c}{Z_R(s) + Z_c} = \frac{Z_c - Z_c}{Z_c + Z_c} = 0$$

$$I_s(s) = \frac{Z_G(s) - Z_c}{Z_G(s) + Z_c} = \frac{0 - Z_c}{0 + Z_c} = -1$$

حل:

$$E_G(s) = \frac{E}{S}$$

با توجه به روابط (9) و (10) داریم:

$$\begin{cases} V(x,s) = \left(\frac{E}{S}\right) (1) \left(e^{-sx/v}\right) = \frac{Ee^{-sx/v}}{S} \\ I(x,s) = \frac{E/Z_c}{S} e^{-sx/v} \end{cases}$$

در حوزه زمان

$$\begin{cases} v(x,t) = Eu_{-1}\left(t - \frac{x}{v}\right) \\ i(x,t) = \frac{E}{Z_c} u_{-1}\left(t - \frac{x}{v}\right) \end{cases}$$

توجه کنید: وارون لاپلاس توسط نرم افزار Matlab و Maple قابل انجام می باشد.

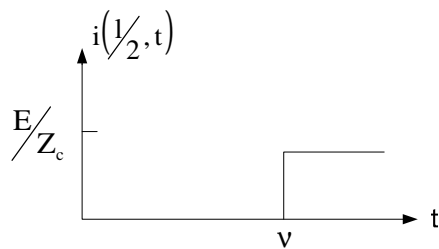
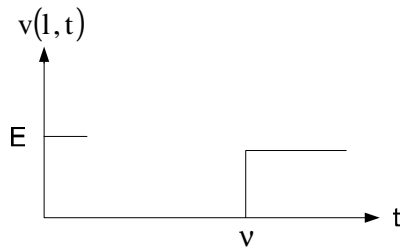
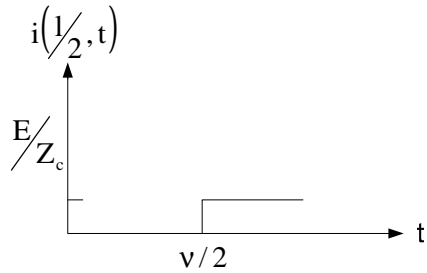
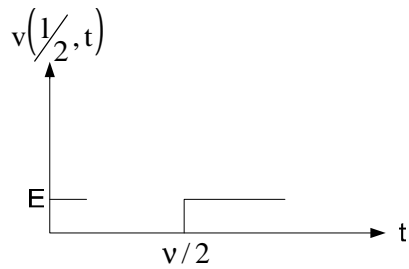
فرض 2: شکل موج ولتاژ و جریان در وسط خط:

$$x = \frac{l}{2}$$

$$\begin{cases} v\left(\frac{l}{2}, t\right) = Eu_{-1}\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \\ i\left(\frac{l}{2}, t\right) = \frac{E}{Z_c} u_{-1}\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \end{cases}$$

و شکل موج در انتهای خط $x=l$

$$\begin{cases} v(l,t) = Eu_{-1}(t - \tau) \\ i(l,t) = \frac{E}{Z_c} u_{-1}(t - \tau) \end{cases}$$



- مثال 2: در مسئله قبل چنانچه انتهای خط باز باشد و خط با یک منبع پله $e_G(t) = E u_{-1}(t)$ با امپدانس داخلی $E_G(S) = Z_C$ برقرار شود مطلوب است.
- 1- مقدار $v(x, t)$ و $i(x, t)$ در هر نقطه خط
 - 2- منحنی تغییرات شکل موج ولتاژ و جریان بر حسب زمان در وسط خط

حل : با توجه به روابط ضرایب انعکاس داریم

$$\Gamma_R(S) = \frac{Z_R(S) - Z_C}{Z_R(S) + Z_C} = \frac{\infty - Z_C}{\infty + Z_C} = 1$$

$$\Gamma_S(S) = \frac{Z_G(S) - Z_C}{Z_G(S) + Z_C} = \frac{Z_C - Z_C}{Z_C + Z_C} = 0$$

$$E_G(S) = \frac{E}{S} \quad \text{منبع در حوزه لاپلاس}$$

با توجه به روابط (9) و (10) داریم:

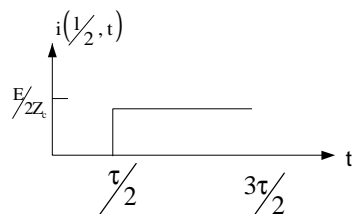
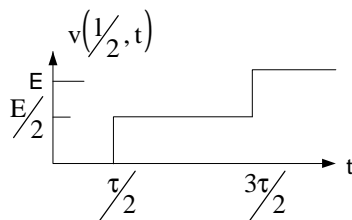
$$\begin{cases} V(x,S) = \frac{E}{S} \left(\frac{1}{2} \left(e^{-sx/v} + e^{s(x/v - 2\tau)} \right) \right) \\ I(x,S) = \frac{E}{S} \left(\frac{1}{2Z_C} \left(e^{-sx/v} - e^{s(x/v - 2\tau)} \right) \right) \end{cases}$$

درحوزه زمان:

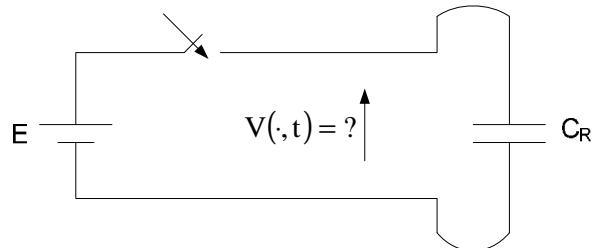
$$\begin{cases} v(x,t) = \frac{E}{2} u_{-1} \left(t - \frac{x}{v} \right) + \frac{E}{2} u_{-1} \left(t + \frac{x}{v} - 2\tau \right) \\ i(x,t) = \frac{E}{2Z_C} u_{-1} \left(t - \frac{x}{v} \right) - \frac{E}{2Z_C} u_{-1} \left(t + \frac{x}{v} - 2\tau \right) \end{cases}$$

منحنی تغییرات ولتاژ و جریان در وسط خط $x = \frac{1}{2}$

$$\begin{cases} v\left(\frac{1}{2}, t\right) = \frac{E}{2} u_{-1} \left(t - \frac{\tau}{2} \right) + \frac{E}{2} u_{-1} \left(t - \frac{3\tau}{2} \right) \\ i\left(\frac{1}{2}, t\right) = \frac{E}{2Z_C} u_{-1} \left(t - \frac{\tau}{2} \right) - \frac{E}{2Z_C} u_{-1} \left(t - \frac{3\tau}{2} \right) \end{cases}$$



کوئیز شماره 1: در شکل مسئله فوق اگر انتهای خط به یک خازن C_R که باردار نیست متصل باشد و مشخصات منبع پله با دامنه E و امپدانس داخلی $Z_G(S)=Z_C$ باشد، مطلوب است تغییرات ولتاژ بر حسب زمان در ابتدای خط $V(:,t)=?$



$$Z_R(S) = \frac{1}{SC_R}$$

$$Z_G(S) = Z_C$$

$$\Gamma_S(S) = \frac{\frac{1}{SC_R} - Z_C}{\frac{1}{SC_R} + Z_C} = \frac{-S + \frac{1}{Z_C C_R}}{S + \frac{1}{Z_C C_R}}$$

$$\Gamma_S(S) = \frac{Z_C - Z_C}{Z_C + Z_C} = 0$$

$$E_G(S) = \frac{E}{S}$$

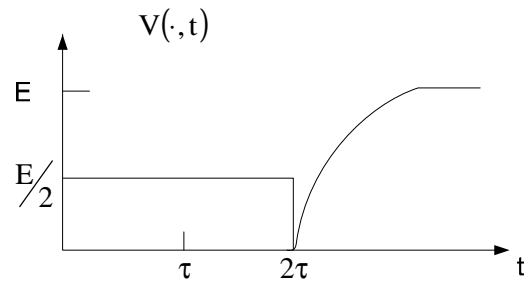
با توجه به رابطه (9)

$$V(x,S) = \frac{E}{S} \left(\frac{1}{2} \left[e^{-s\frac{x}{v}} + \left(\frac{-S + \frac{1}{Z_C C_R}}{+S + \frac{1}{Z_C C_R}} \right) C^{s\left(\frac{x}{v} - 2\tau\right)} \right] \right)$$

$$V(x,S) = \frac{E}{2} \left[\frac{e^{-s\frac{x}{v}}}{S} \left(\frac{1}{S} - \frac{2}{S + \frac{1}{Z_C C_R}} \right) e^{s\left(\frac{x}{v} - 2\tau\right)} \right]$$

$$v(x, t) = \frac{E}{2} u_{-1} \left(t - \frac{x}{v} \right) + \frac{E}{2} \left[1 - 2e^{-\frac{-1 \left(t + \frac{x}{v} - 2\tau \right)}{Z_c C_R}} \right] u_{-1} \left(t + \frac{x}{v} - 2\tau \right)$$

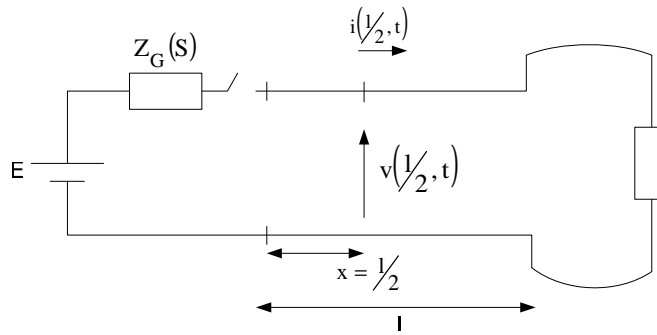
$$v(\cdot, t) = \frac{E}{2} u_{-1}(t) + \frac{E}{2} \left[1 - 2e^{-\frac{-1}{Z_c C_R}(t-2\tau)} \right] u_{-1}(t-2\tau)$$



جلسه سوم

بحث را با یک مسئله آغاز می‌کنیم

مسئله: خط تک فاز بدون تلفات که انتهای آن بار $Z_R(s) = \frac{Z_C}{3}$ قرار دارد، از طریق یک منبع با مشخصات $e_G(t) = Eu_{-1}(t)$ و امپدانس داخلی منبع $Z_G = 2Z_C$ برقرار کرده‌ایم. مطلوب است منحنی تغییرات ولتاژ بر حسب زمان در وسط خط $v(\frac{1}{2}, t) = ?$



حل:

$$\Gamma_R(s) = \frac{Z_R(s) - Z_C}{Z_R(s) + Z_C} = \frac{\frac{Z_C}{3} - Z_C}{\frac{Z_C}{3} + Z_C} = \frac{-1}{2}$$

$$\Gamma_S(s) = \frac{Z_G(s) - Z_C}{Z_G(s) + Z_C} = \frac{2Z_C - Z_C}{2Z_C + Z_C} = \frac{1}{3}$$

$$E_G(s) = \frac{E}{s}$$

از اینجا به بعد بیشتر در مورد حالت گذرای ولتاژ صحبت می‌شود. (در کلیدزنی‌ها)

با توجه به رابطه ولتاژ (8)

$$V(x, s) = \frac{E}{s} \left(\frac{1}{3} \right) \left[\frac{e^{-sx/v} - \frac{1}{2} e^{s(\frac{x}{v} - 2\tau)}}{1 + \frac{1}{6} e^{-S\tau}} \right]$$

$$Y = \frac{1}{6} e^{-2S\tau}$$

$$\frac{1}{1+Y} = 1 - Y + Y^2 - Y^3 + Y^4 - \dots$$

با استفاده از سری هندسی داریم:

$$V(x,S) = \frac{E}{3S} \left[e^{-Sx/v} - \frac{1}{2} e^{S\left(\frac{x}{v} - 2\tau\right)} \right] \left[1 - \frac{1}{6} e^{-2S\tau} + \frac{1}{36} e^{-4S\tau} - \dots \right]$$

$$v(x,t) = \frac{E}{3} \left[u_{-1}\left(t + \frac{x}{v}\right) - \frac{1}{2} u_{-1}\left(t + \frac{x}{v} - 2\tau\right) - \frac{1}{6} u_{-1}\left(t - \frac{x}{v} - 2\tau\right) \right]$$

در وسط خط:

$$v\left(\frac{1}{2}, t\right) = \frac{E}{3} \left[u_{-1}\left(t - \frac{\tau}{2}\right) - \frac{1}{2} u_{-1}\left(t - \frac{3\tau}{2}\right) - \frac{1}{6} u_{-1}\left(t - \frac{5\tau}{2}\right) + \dots \right]$$

شکل موج ولتاژ در وسط خط

توجه کنید مقدار ولتاژ در حالت دائم را می‌توان از قضیه نهایی به دست آورد:

$$V_{ss}(x) = \lim_{t \rightarrow \infty} v\left(\frac{1}{2}, t\right) = \lim_{S \rightarrow 0} SV(x,S) = \lim_{S \rightarrow 0} \left[S \left(\frac{E}{S} \right) \left(\frac{1}{3} \right) \left[\frac{e^{-Sx/v} - \frac{1}{2} e^{S\left(\frac{x}{v} - 2\tau\right)}}{1 + \frac{1}{6} e^{-2S\tau}} \right] \right]$$

$$= E \left(\frac{1}{3} \right) \left(\frac{1 - \frac{1}{2}}{1 + \frac{1}{6}} \right) = \frac{E}{7}$$

ب: روش بیولی (دیاگرام نرده‌ای) جهت محاسبه ولتاژ حالت گذرا در خط تک فاز بدون تلفات دیاگرام نرده‌ای توسط آقای بیولی ابداع شد که توسط این روش انعکاسات امواج ولتاژ و جریان که در دوران گذرا در خطوط انتقال رخ می‌دهد به سهولت سازمان می‌دهد. در دیاگرام نرده‌ای بیولی مطابق شکل زیر محور عمودی نمایانگر زمان می‌باشد و به واحدهای τ (زمان گذرای خط $\tau = \frac{1}{v}$) تقسیم‌بندی شده است و محور افقی نمایش موقعیت خط (x) می‌باشد و خطوط مورب (قطری) نمایانگر امواج سیار است که هر انعکاس از حاصل ضرب موج تابشی و ضریب انعکاس آخر خط (یا اول خط) به دست می‌آید. ولتاژ $v(x,t)$ در هر نقطه x و زمان t از روی دیاگرام نرده‌ای از جمع نمودن تمام تابش‌ها و انعکاس‌های بالای این نقطه به دست می‌آید. (اثبات به عهده دانشجوی)

شکل زیر نمایش دیاگرام نرده‌ای بیولی می‌باشد:

فرمول بیولی $v(x,t) = \sum v_i + v_r$

مثال 2: مطلوب است دیاگرام نرده‌ای بیولی برای مسئله 1 واز روی آن ولتاژ در $\frac{1}{3}$ را بدست آورید:
 حل: ولتاژ تابشی در زمان $t=0$ از تقسیم ولتاژ به دست می‌آید و عبارت است از:

$$V_1(S) = E_G(S) \times \frac{Z_C}{Z_C + Z_G} = \frac{E}{S} \left(\frac{1}{1+2} \right) = \frac{E}{3S}$$

$$\Gamma_R(S) = \frac{\frac{Z_C}{3} - Z_C}{\frac{Z_C}{3} + Z_C} = -\frac{1}{2} \quad \Gamma_S(S) = \frac{2Z_C - Z_C}{2Z_C + Z_C} = \frac{1}{3}$$

ولتاژ در نقطه $x = \frac{1}{3}$ با رسم یک خط قائم در $x = \frac{1}{3}$ روی دیاگرام نرده‌ای به دست می‌آید. ولتاژ، از جمع ولتاژ تابشی و انعکاس به دست می‌آید. $v(\frac{1}{3}, t) = \sum v_i + v_r$ با شروع از نقطه بالای خط قائم در زمان $t=0$ و حرکت به سمت پائین ولتاژ نقطه $v(\frac{1}{3}, t)$ را می‌توان رسم کرد.

تکلیف: در مسئله فوق ولتاژ ابتدا و انتهای خط را به دست آورید.

چند قضیه مهم در بحث دیاگرام بیولی:

قضیه 1: ضریب انعکاس و عبور موج در محل اتصال دو خط بدون تلفات A و B که امپدانس مشخصه هر یک Z_A و Z_B است، مطابق شکل زیر عبارت است از:

$$\Gamma_{AA} = \frac{Z_B - Z_A}{Z_B + Z_A} \quad \Gamma_{BA} = \frac{2Z_B}{Z_B + Z_A}$$

مثال: یک خط تک فاز بدون تلفات هوایی به یک کابل تک فاز متصل است، مشخصات هر یک به شرح زیر است:

$$\begin{array}{llll} Z_A = 400\Omega & , & v_A = 3 \times 10^8 \text{ m/s} & , & L_A = 30 \text{ km} & \text{مشخصات خط:} \\ Z_B = 100\Omega & , & v_B = 2 \times 10^8 \text{ m/s} & , & L_B = 20 \text{ km} & \text{مشخصات کابل:} \end{array}$$

اگر خط A توسط یک منبع پله $e_g(t) = E u_{-1}(t)$ با امپدانس داخلی $Z_G(S) = Z_A$ برقرار شود چنانچه انتهای کابل B بار $Z_R = 2Z_B = 200\Omega$ متصل باشد، مطلوب است:

1- رسم دیاگرام بیولی

2- منحنی ولتاژ محل اتصال خط و کابل بر حسب زمان در فاصله زمانی $0 \leq t < 0.6\mu\text{sec}$

حل:

$$\tau_A = \frac{l_A}{v_A} = \frac{30 \times 10^3}{3 \times 10^8} = 0.1 \times 10^{-3} \text{ sec}$$

$$\tau_B = \frac{l_B}{v_B} = \frac{20 \times 10^3}{2 \times 10^8} = 0.1 \times 10^{-3} \text{ sec}$$

$$\Gamma_S = \frac{Z_G - Z_A}{Z_G + Z_A} = \frac{Z_A - Z_A}{Z_A + Z_A} = 0 \quad (Z_G = Z_A)$$

$$\Gamma_R = \frac{Z_R - Z_B}{Z_R + Z_B} = \frac{2Z_B - Z_B}{2Z_B + Z_B} = \frac{1}{3} \quad (Z_R = 2Z_B)$$

از طرف چپ

$$\begin{cases} \Gamma_{AA} = \frac{Z_B - Z_A}{Z_B + Z_A} = \frac{100 - 400}{100 + 400} = -\frac{3}{5} \\ \Gamma_{BA} = \frac{2Z_B}{Z_B + Z_A} = \frac{2 \times 400}{100 + 400} = \frac{8}{5} \end{cases}$$

از طرف راست

$$\begin{cases} \Gamma_{BB} = \frac{Z_A - Z_A}{Z_A + Z_A} = \frac{400 - 100}{400 + 100} = \frac{3}{5} \\ \Gamma_{AB} = \frac{2Z_A}{Z_A + Z_B} = \frac{2 \times 400}{400 + 100} = \frac{8}{5} \end{cases}$$

دیاگرام بیولی در شکل زیر نشان داده شده است. در این دیاگرام اولین موج سیار عبارت است از:

$$V_1(S) = E_G(S) \left(\frac{Z_A}{Z_A + Z_G} \right) = \frac{E}{S} \left(\frac{1}{2} \right) = \frac{E}{2S}$$

هنگامی که موج $V_1(S)$ وارد محل اتصال می شود ولتاژ $V_2(S)$ منعکس و ولتاژ عبور $V_3(S)$ با استفاده از ضرایب انعکاس و عبور در محل اتصال به دست می آید.

$$V_2(S) = \Gamma_{AA} V_1(S) = \left(-\frac{3}{5} \right) \left(\frac{E}{2S} \right) = -\frac{3E}{10S}$$

$$V_3(S) = \Gamma_{BA} V_1(S) = \left(\frac{2}{5} \right) \left(\frac{E}{2S} \right) = \frac{E}{5S}$$

هنگامی که $V_3(S)$ به انتهای خط B می رسد با ضریب انعکاس آخر خط به صورت $V_A(S)$ منعکس می شود.

$$V_A(S) = \Gamma_R(S) V_3(S) = \frac{1}{3} \left(\frac{E}{5S} \right) = \frac{E}{15S}$$

وقتی $V_4(S)$ از سمت راست به محل اتصال دو خط برخورد نماید، موج با ضریب انعکاس Γ_{BB} به صورت $V_5(S)$ منعکس و با ضریب عبور Γ_{AB} به صورت $V_6(S)$ عبور می‌نماید.

$$V_5(S) = \Gamma_{BB} V_4(S) = \left(\frac{3}{5} \right) \left(\frac{E}{15S} \right) = \frac{3E}{75S}$$

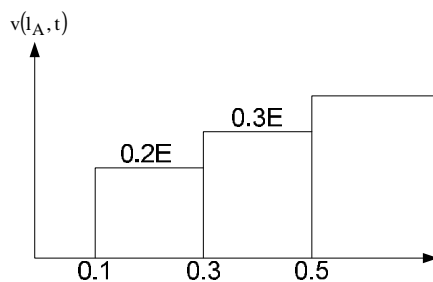
$$V_6(S) = \Gamma_{AB} V_4(S) = \left(\frac{8}{5} \right) \left(\frac{E}{15S} \right) = \frac{8E}{75S}$$

نکته تکمیلی: طبق قضیه بیولی ولتاژ در هر نقطه از دو قاعده زیر به دست می‌آید:

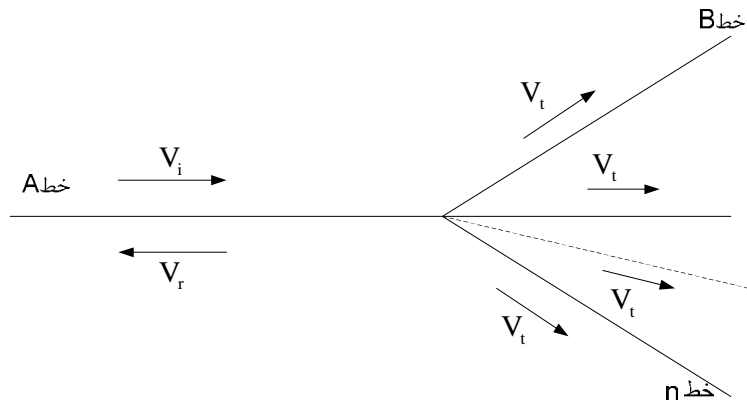
$$v(x,t) = \sum v_i + v_r \quad \text{قاعده (۱)}$$

$$v(x,t) = \sum v_t \quad \text{قاعده (۲)}$$

برای رسم ولتاژ در محل اتصال از قاعده مجموع ولتاژهای تابشی و انعکاسی و یا از مجموع ولتاژهای عبور استفاده می‌کنیم.



قضیه دوم: تعمیم ضرب انعکاس و عبور در محل اتصال چند خط هوایی و کابل

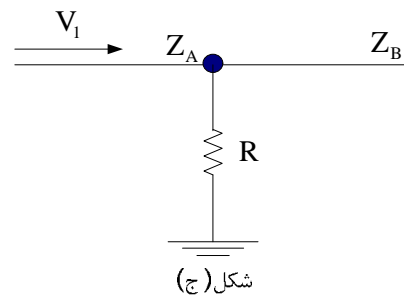
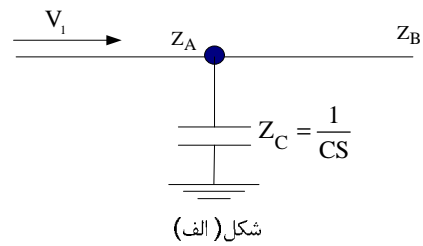
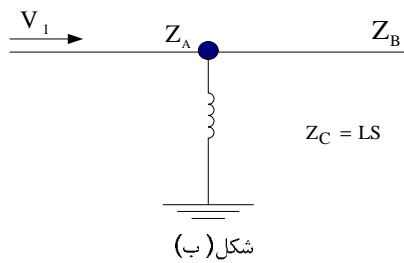


خطوط متصل به خط A را می‌توان معادل Z_{eq} قرار داد

$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C} + \dots$$

و مثل قضیه قبل عمل کرد.

تکلیف 2-3: ضرایب انعکاس و عبور در شکل‌های زیر را به دست آورید.



محاسبه اضافه ولتاژها در برقدار کردن در یک خط تکفاز به روش برژرون

مدل گسسته شبکه جهت مطالعات حالت گذرا (برژرون)

مقدمه:

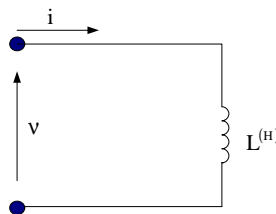
هدف ما در این بخش استخراج مدل‌های گسسته زمانی خطوط تکفاز بدون تلفات و عناصر فشرده R و C، L مناسب برای محاسبات کامپیوتری حالت گذرا در شبکه در فواصل زمانی گسسته $t-\Delta t, t-2\Delta t, \dots$ می‌باشد.

مدل‌های گسسته زمانی معرفی شده به عنوان مدارهای معادل شامل مقاومت‌های فشرده و منابع جریان می‌باشد. منابع جریان در مدل‌ها نمایش رفتار زمان گذشته مدار است که شامل زمان‌های $t-\Delta t, t-2\Delta t, \dots$ می‌باشد.

توجه کنید: بعد از اتصال مدارات معادل برای همه عناصر در یک شبکه داده شده، معادلات گره برای هر زمان گسسته را می‌نویسیم و به صورت تکرار توسط یک برنامه کامپیوتری مدار را حل می‌کنیم. مدل زمان گسسته شبکه اولین بار توسط آقای برژرون L.Berjeron ارائه گردید و اساس نرم‌افزار (ATP)EMTP می‌باشد.

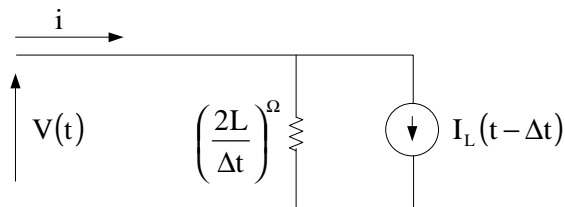
معادل ناپیوسته (گسسته) اجزاء یک شبکه قدرت

الف - معادل ناپیوسته (گسسته) یک سلف با اندوکتانس ثابت $L(H)$ می‌دانیم مدل پیوسته که یک سلف عبارت است از:



$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

می‌خواهیم ثابت کنیم مدل گسسته سلف، مطابق مدار زیر است:

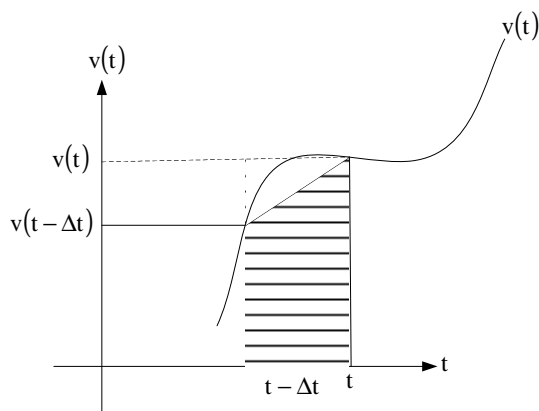


$$I_L(t-\Delta t) = i(t-\Delta t) + \frac{v(t-\Delta t)}{2L/\Delta t}$$

$$di(t) = \frac{1}{L} V(t) dt \quad (2)$$

اثبات : رابطه (1) را به صورت زیر می نویسیم:

اگر ولتاژ اعمالی به سلف به صورت زیر باشد:



توضیح : زمان را به صورت اندازه قدم های Δt تقسیم می کنیم

از رابطه (2) در فاصله زمانی $t-\Delta t$ تا t انتگرال می گیریم:

$$\int_{t-\Delta t}^t di(t) = \frac{1}{L} \int_{t-\Delta t}^t v(t) dt \quad (3)$$

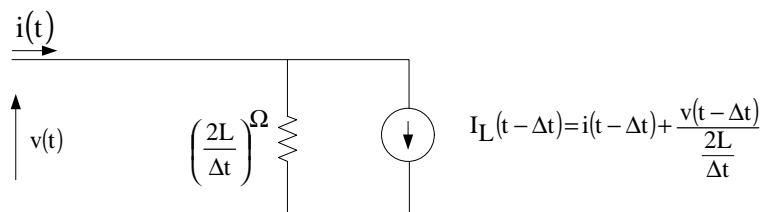
$$i(t) - i(t-\Delta t) = \frac{1}{L} \left(\frac{\Delta t}{2} \right) [v(t) + v(t-\Delta t)] \quad (4)$$

$$i(t) = \frac{v(t)}{\left(\frac{2L}{\Delta t}\right)} + \left[i(t-\Delta t) + \frac{v(t-\Delta t)}{\frac{2L}{\Delta t}} \right] \quad (5)$$

پس از مرتب کردن داریم:

$$\begin{cases} i(t) = \frac{v(t)}{\left(\frac{2L}{\Delta t}\right)} + I_L(t - \Delta t) \\ I_L(t - \Delta t) = i(t - \Delta t) + \frac{v(t - \Delta t)}{\frac{2L}{\Delta t}} \end{cases}$$

مدار معادل رابطه (6) به صورت زیر است که سلف جانشین یک مقاومت تخیلی $\frac{2L}{\Delta t}$ موازی با یک منبع جریان $I_L(t - \Delta t)$ شده است.



تکلیف 4-1: با توجه به مدل گسسته یک سلف، ثابت کنید:

$$I_L(t - \Delta t) = i(t - \Delta t) + \frac{v(t - \Delta t)}{\frac{2L}{\Delta t}} = I_L(t - 2\Delta t) + \frac{v(t - \Delta t)}{\frac{L}{\Delta t}}$$

توجه کنید رابطه (5) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} t &= 0, \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots \\ k &= 0, 1, 2, 3, \dots \\ i(k) &= \frac{v(k)}{\frac{2L}{\Delta t}} + \left[i(k-1) + \frac{v(k-1)}{\frac{2L}{\Delta t}} \right] \end{aligned} \quad (5')$$

ب - معادل ناپیوسته (گسسته) یک خازن با ظرفیت ثابت $C^{(F)}$

می‌دانیم مدل پیوست یک خازن عبارت است از:

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$$

می‌خواهیم ثابت کنیم مدل گسسته یک خازن مطابق مدار زیر است:

که در آن:

$$I_C(t - \Delta t) = i(t - \Delta t) + \frac{v(t - \Delta t)}{\frac{\Delta t}{2C}}$$

اثبات: رابطه (1) را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$dv(t) = \frac{1}{C} i(t) dt \quad (2)$$

از رابطه (2) در فاصله $t - \Delta t$ تا t انتگرال می‌گیریم:

$$\int_{t-\Delta t}^t dv(t) = \frac{1}{C} \int_{t-\Delta t}^t i(t) dt \quad (3)$$

با استفاده از انتگرال دوزنقه‌ای

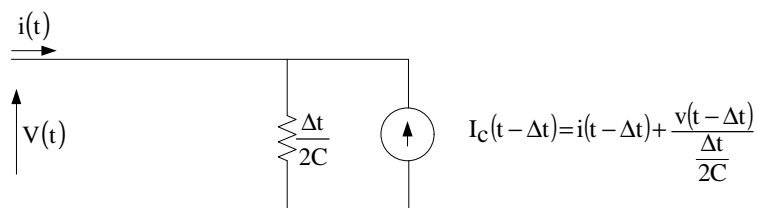
$$v(t) - v(t - \Delta t) = \frac{1}{C} \left(\frac{\Delta t}{2} \right) [i(t) + i(t - \Delta t)] \quad (4)$$

با مرتب کردن رابطه (4) داریم:

$$i(t) = \frac{v(t)}{\frac{\Delta t}{2C}} - \left[i(t - \Delta t) + \frac{v(t - \Delta t)}{\frac{\Delta t}{2C}} \right] \quad (5)$$

$$\begin{cases} i(t) = \frac{v(t)}{\frac{\Delta t}{2C}} - I_C(t - \Delta t) \\ I_C(t - \Delta t) = i(t - \Delta t) + \frac{v(t - \Delta t)}{\frac{\Delta t}{2C}} \end{cases} \quad (6)$$

با توجه به معادله (6) مدار معادل گسسته خازن را رسم می‌کنیم:



تکلیف 2-4: ثابت کنید با توجه به مدل گسسته خازن، رابطه زیر برقرار است:

$$I_C(t - \Delta t) = i(t - \Delta t) + \frac{v(t - \Delta t)}{\frac{\Delta t}{2C}} = -I_C(t - 2\Delta t) + \frac{v(t - \Delta t)}{\frac{\Delta t}{4C}}$$

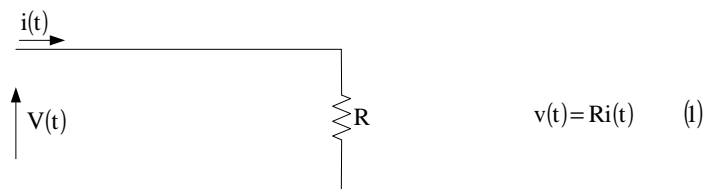
نتیجه: مدل گسسته یک خازن یک مقاومت تخیلی $\frac{\Delta t}{2C}$ اهمی به موازات یک منبع جریان $I_C(t - \Delta t)$ است.

رابطه (5) را می‌توان به صورت‌های زیر نوشت:

$$i(k) = \frac{v(k)}{\frac{\Delta t}{2C}} - \left[i(k-1) + \frac{v(k-1)}{\frac{\Delta t}{2C}} \right] \quad (5)$$

$$v(k) = [i(k) - i(k-1)] \frac{\Delta t}{2C} + v(k-1)$$

ج - معادل ناپیوسته (گسسته) یک مقاومت اهمی با مقاومت ثابت $R^{(\Omega)}$ می‌دانیم مدل پیوسته یک مقاومت عبارت است از:

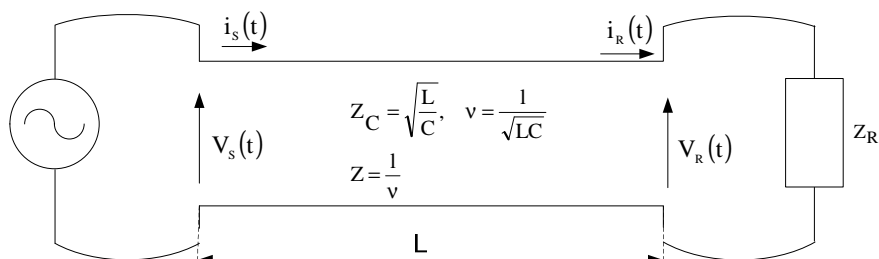


مقاومت، یک عنصر بدون حافظه است (Memory Less) و مدل گسسته آن مشابه مدل پیوسته است:

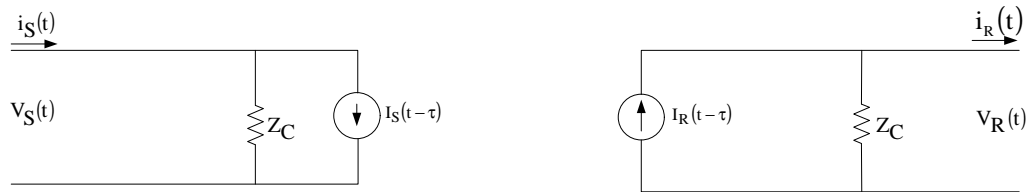
$$v(k) = Ri(k) \quad (2)$$

د - معادل ناپیوسته (گسسته) یک خط انتقال تک فاز بدون تلفات می‌دانیم مدل پیوسته یک خط تک‌فاز عبارت است از:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \end{cases}$$



ثابت می‌شود که مدل گسسته خط تکفاز بدون تلفات عبارت است از:



که در آن:

$$\begin{cases} i_S(t) = \frac{1}{Z_C} v_S(t) + I_S(t-\tau) \\ I_S(t-\tau) = i_R(t-\tau) - \frac{1}{Z_C} v_S(t-\tau) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} i_R(t) = I_R(t-\tau) - \frac{1}{Z_C} v_R(t) \\ I_R(t-\tau) = i_S(t-\tau) + \frac{1}{Z_C} v_S(t-\tau) \end{cases} \quad (2)$$

اثبات به عهده دانشجو (مرجع کتاب Glover یا Green Wood)

تکلیف 4-4: ثابت کنید در مدل گسسته خط انتقال بدن تلفات تکفاز، روابط زیر صادق است:

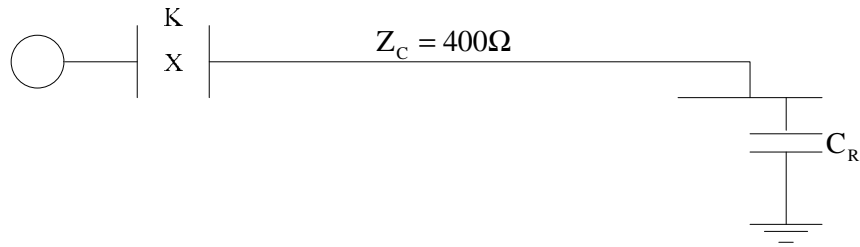
$$I_R(t-\tau) = I_S(t-2\tau) + \frac{2}{Z_C} v_S(t-\tau) \quad (1)$$

$$I_S(t-\tau) = I_R(t-2\tau) + \frac{2}{Z_C} v_R(t-\tau) \quad (2)$$

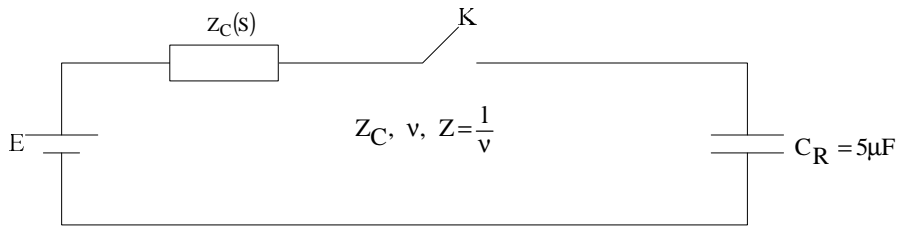
معادلات گره ناپیوسته یک شبکه قدرت

یک شبکه شامل خطوط انتقال گسترده و عناصر فشرده R و L و C را می‌توان با معادل ناپیوسته عناصر آن جانشین کرد. سپس با نوشتن معادلات گره توسط کامپیوتر، ولتاژ را در محل گره‌ها برحسب اغتشاشی که در شبکه رخ می‌دهد در حالت گذرا به دست آورد. در ادامه با حل یک مسئله، کاربرد روش گسسته‌سازی در حل شبکه‌های قدرت برای حالت گذرا را بررسی می‌کنیم.

مسئله: شبکه قدرت زیر مفروض است،



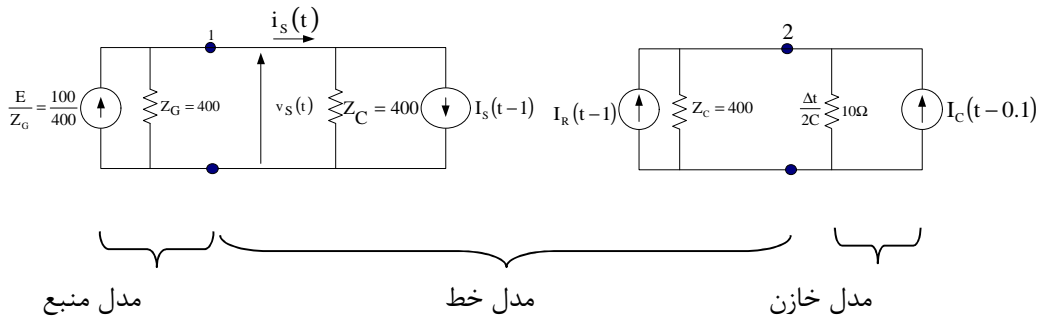
مشخصات اجزاء شبکه عبارت است از :



$$Z_G = Z_C = 400\Omega \quad Z = 1\text{ms}, \quad E = 100\text{kV}, \quad \Delta t = 0.1\text{ms}$$

مطلوب است:

- 1- معادلات گره ناپیوسته شبکه با جانشین کردن عناصر گسسته
- 2- اگر خط توسط کلید k برقرار شود ولتاژ ابتدا و انتهای خط را پس از برقرار کردن در مدت $0 < t < 9\text{ms}$ به دست آورید. ($\Delta t = 0.1\text{ms}$)



معادلات گره:

$$[Y][V]=[I]$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{400} + \frac{1}{400} & 0 \\ 0 & \frac{1}{400} + \frac{1}{10} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_S(t) \\ v_R(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} - I_S(t-1) \\ I_R(t-1) + I_C(t-1) \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} v_S(t) = 200 \left[\frac{1}{4} - I_S(t-1) \right] & (a) \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_R(t) = 9.7561 [I_R(t-1) + I_C(t-0.1)] & (b) \end{cases}$$

منابع جریان در شکل را با توجه به فرمول‌های مربوطه، (البته آرگومان $t-2$ را با t) جایگزین می‌کنیم.

$$\begin{cases} I_R(t-\tau) = I_S(t-2\tau) + \frac{2}{Z_C} v_S(t-\tau) \\ I_S(t-\tau) = I_E(t-2\tau) + \frac{2}{Z_C} v_R(t-\tau) \\ I_C(t-\tau) = I_R(t-\Delta t) + \frac{v_R(t-\Delta t)}{\frac{\Delta E}{2C}} = -I_C(t-2\Delta t) + \frac{v(t-\Delta t)}{\frac{\Delta t}{4C}} \end{cases}$$

$$I_R(t) = I_S(t-1) + \frac{2}{400} v_S(t) \quad (c)$$

$$I_S(t) = I_R(t-1) + \frac{2}{400} v_R(t) \quad (d)$$

$$I_C(t) = I_C(t-0.1) + \frac{1}{5} v_R(t) \quad (e)$$

معادلات a, b, c, d, e بسیار مناسب برای حل با کامپیوتر می‌باشد و به ترتیب زیر از زمان $t=0$ آغاز می‌کنیم.

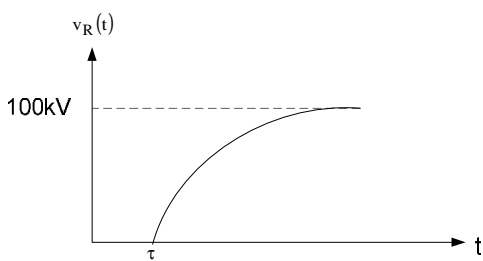
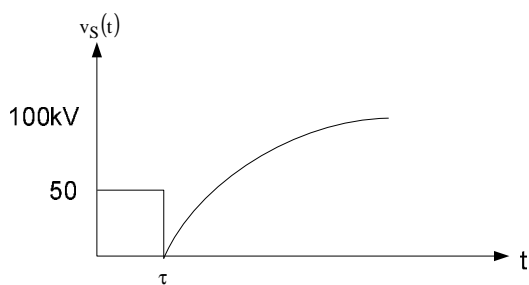
قدم اول: محاسبه $v_S(t)$ و $v_R(t)$ در معادله a و b برای $t=0$

قدم دوم: محاسبه $I_C(t)$, $I_S(t)$, $I_R(t)$ از معادله c, d, e و ذخیره آنها

قدم سوم: تغییر زمان t به $t + \Delta t$ ($\Delta t = 0.1$) و برگشت به قدم اول

نکته: چون خازن و خط در زمان‌های کمتر از صفر برقدار نبوده (No Trapped Charge) جریان‌های I_C , I_S , I_R برای زمان‌های منفی، صفر است.

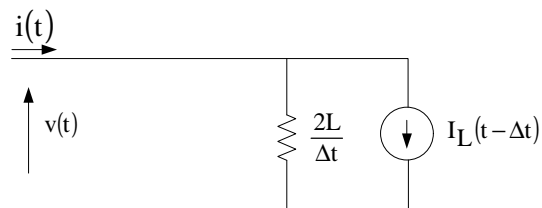
تکلیف: برنامه کامپیوتری بنویسید که معادلات a, b, c, d, e را مطابق الگوریتم اشاره شده حل کند و ولتاژ ابتدا و انتهای خط را برای زمان داده شده رسم کند.



ادامه بحث مدل برزرون در مطالعات حالت گذرا معرفی نرم افزار (ATP)EMTP

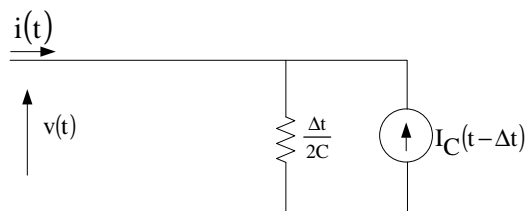
اساس برنامه ATP بر مبنای مدل گسسته اجزاء سیستم قدرت و معادلات گره می باشد.
یادآوری مدل گسسته اجزاء شبکه:

1- مدل گسسته سلف



$$i(k) = \frac{v(k)}{2L/\Delta t} + \left[i(k-1) + \frac{v(k-1)}{2L/\Delta t} \right]$$

2- مدل گسسته خازن



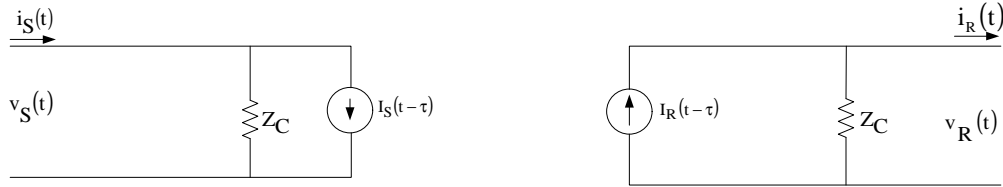
$$i(k) = \frac{v(k)}{\frac{\Delta t}{2C}} - \left[i(k-1) + \frac{v(k-1)}{\frac{\Delta t}{2C}} \right]$$

$$v(k) = [i(k) + i(k-1)] \frac{\Delta t}{2C} + v(k-1)$$

3- مدل گسسته مقاومت

$$v(k) = Ri(k)$$

4- مدل گسسته خط انتقال تک فاز بدون تلفات



$$\begin{cases} i_s(t) = \frac{1}{Z_c} v_s(t) + I_s(t-\tau) \\ I_s(t-\tau) = i_R(t-\tau) - \frac{1}{Z_c} v_s(t-\tau) \end{cases}$$

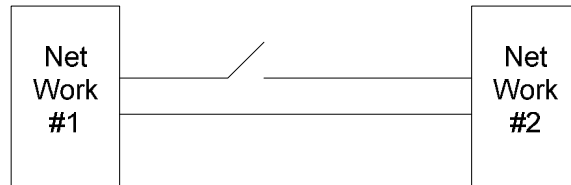
$$\tau = \frac{1}{v}, v = \frac{1}{\sqrt{lc}}$$

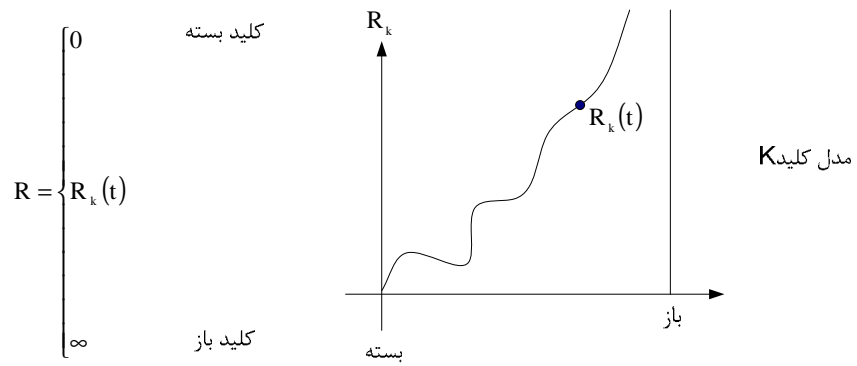
$$\begin{cases} i_R(t) = I_R(t-\tau) - \frac{1}{Z_c} v_R(t) \\ I_R(t-\tau) = i_s(t-\tau) + \frac{1}{Z_c} v_s(t-\tau) \end{cases}$$

معادلات گره ناپیوسته در یک شبکه شامل خطوط انتقال گسترده و عناصر فشرده C, L, R به صورت زیر است:

$$[Y][v] = [I]$$

با توجه به معادلات گره و معادلات جانبی حاکم بر خط و خازن و سلف به صورت تکرار با توجه به شرایط اولیه می‌توان ولتاژ ولتاژ گره‌های شبکه را براساس اغتشاشات باز شدن کلید و بستن کلید به دست آورد. توجه کنید مدل کلید در مطالعات حالت گذرا در حالت Opening و Closing که با آن قوس همراه است و مدل‌سازی قوس، توسط Mayer و Cassie برای کلیدها ارائه شده (ضعیف است). در دانشگاه T.u.Delft هلند نرم‌افزاری به نام Arc Modeling Circuit Breakers وجود دارد که در آن هفت مدل دقیق برای کلید ارائه شده است. (در سایت خودش)





مدل آرک در کلیدهای فشار قوی توسط معادله دیفرانسیلی که از مدل میکروسکوپی استخراج شده است در ادبیات علمی توسط آقایان Swchartz, Showmaker, Cassie, Mayer ارائه شده است. در زیر به مدل معادله دیفرانسیل حاکم بر قوس کلید اشاره می‌شود:

(1)Mayer Arc Modeling

کندوکتانس قوس در کلید

کندوکتانس قوس

ولتاژ قوس

جریان قوس

ثابت زمانی قوس از زمان روشن شدن تا خاموش شدن قوس

توان خنک شونده قوس

$$g(t) = \frac{1}{R(t)}$$

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{p} - 1 \right)$$

g :

u :

i :

τ :

p :

$$R_k(t) = \frac{1}{g(t)}$$

(2)Cassie Arc Modeling

کندوکتانس قوس

ولتاژ قوس

ثابت زمانی قوس

جریان قوس

ثابت ولتاژ قوس $f(i)$

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u^2}{u_c^2} - 1 \right)$$

g :

u :

τ :

i :

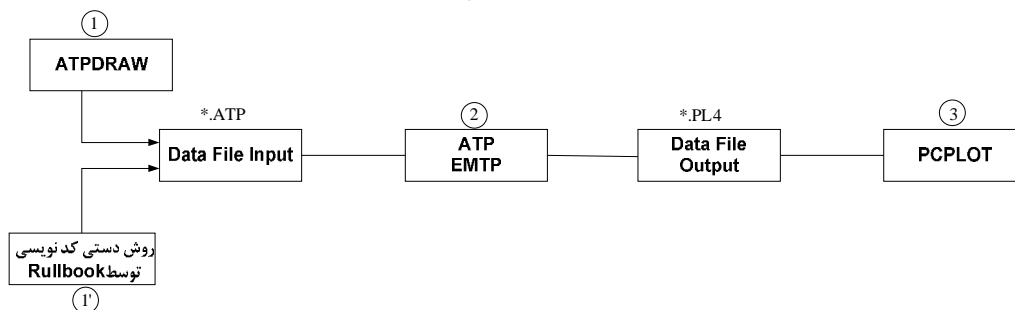
u_c :

$$R = \frac{1}{g} \Rightarrow \text{مقاومت قوس}$$

تکلیف 5-2: یک شبکه دلخواه را در نظر بگیرید که حالت گذرای آن را براساس باز کردن یا بستن یک کلید در شبکه می‌خواهیم مطالعه کنیم مانند ولتاژ در یک نقطه و جریان در یک نقطه دیگر. با در نظر گرفتن مدل کلید فشار قوی در حالت گذرا توسط مدل قوس Mayer و Cassie، شبیه‌سازی نموده و آثار این دو مدل را با هم مقایسه کنید.

تکلیف 5-3: مدل‌های کلیدهای فشار قوی دانشگاه T.V.Delft را از روی سایت www.tudelft.nl دانلود کرده و مقایسه تاثیر مدل کلیدها را در یک شبکه نمونه تجربه کنید.

دیاگرام زیر نحوه کار با نرم افزار ATP(EMTP) را نشان می دهد:



مطالعات حالت گذرا به سه نرم افزار زیر احتیاج دارد:

- 1- نرم افزار گرافیکی ATPDRAW ← تولید شکل شبکه
- 2- نرم افزار اصلی ATP ← پردازش حالت گذرا
- 3- نرم افزار گرافیکی PCPLOT ← رسم خروجی حالت گذرا

گام های اجرایی برنامه

گام اول: اجرای برنامه ATPDRAW شامل:

- 1- رسم شمای گرافیکی شبکه
- 2- نام گذرای Node های شبکه (با حروف بزرگ)
- 3- مقدار دهی عناصر
- 4- درخواست خروجی
- 5- تنظیم پارامترهای کنترلی
- 6- ایجاد فایل اطلاعاتی ATP و ذخیره سازی در یک مسیر مشخص با Make Files Option

گام دوم: اجرای برنامه ATP شامل:

دادن آدرس و نام فایل اطلاعاتی شبکه ای که می خواهیم تحلیل کنیم و اخذ فایل خروجی تحت همان نام و پسوند PL4 در همان مسیر

گام سوم: اجرای برنامه PCPLOT شامل:

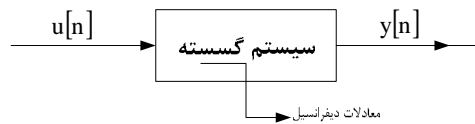
- 1- دادن آدرس و نام فایل خروجی ATP
- 2- انتخاب نقاطی که می خواهیم رسم کنیم

تکلیف 5-1- توسط نرم افزار EMTP، چهارده مثال کپی ضمیمه را حل نمایید.

4- مطالعه حالت گذرا در حوزه Z

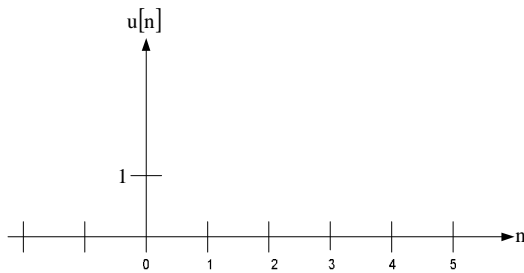
یادآوری تبدیل Z

در مهندسی برق سیگنال‌های گسسته به حوزه Z برده می‌شود همانطور که سیگنال‌های پیوسته را به حوزه S می‌بریم.



معرفی چند سیگنال گسسته معروف:

1- سیگنال ضربه واحد گسسته:

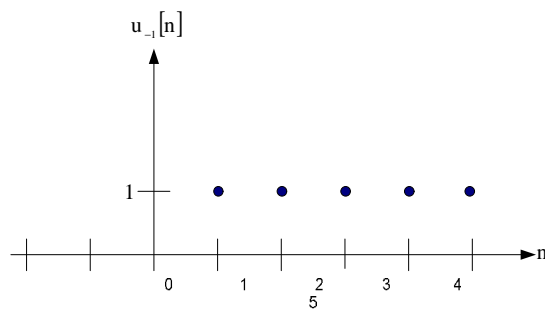


$$\delta[n] = u_0[n] = \begin{cases} 1, & n=0 \\ 0, & n \neq 0 \end{cases}$$

توجه کنید سیگنال ضربه را به صورت زیر هم می‌نویسند:

$$u_0[n-k] = \delta[n-k] = \begin{cases} 1, & n=k \\ 0, & n \neq k \end{cases}$$

2- سیگنال پله واحد گسسته



$$u_{-1}[n] = \begin{cases} 1, & n \geq 0 \\ 0, & n < 0 \end{cases}$$

توجه کنید سیگنال پله واحد گسسته را می‌توان برحسب ضربه واحد گسسته نوشت:

$$u_{-1}[n] = u_0[n] + u_0[n-1] + \dots + u_0[n-k]$$

$$u_{-1}[n] = \sum_{k=0}^{\infty} u_0[n-k]$$

قضیه 1: برای هر سیگنال دلخواه $e[n]$ داریم:

$$u_0[n-k]e[n] = \begin{cases} e[n] & , k = n \\ 0 & k \neq n \end{cases}$$

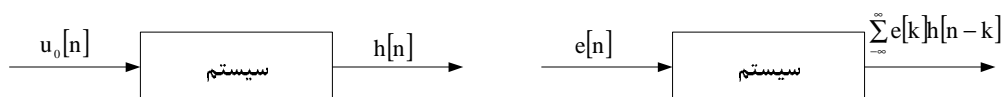
قضیه 2: رابطه (1) معادل رابطه (2) در حوزه پیوسته است:

$$e[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} e[k]u_0[n-k] \quad (1)$$

$$e(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u_0(t-\tau)e(\tau)d\tau \quad (2)$$

قضیه 3: اگر پاسخ ضربه واحد سیستم خطی را با $h[n]$ نشان دهیم، پاسخ آن سیستم به هر ورودی دلخواه $e[n]$ ، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$u[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} e[k]h[n-k]$$



توجه کنید همین بحث در رابطه با سیستم‌های خطی پیوسته صادق است. یعنی اگر $h(t)$ پاسخ ضربه واحد به یک سیستم خطی پیوسته باشد، پاسخ آن سیستم به ورودی دلخواه $x(t)$ ، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t-\tau)d\tau$$

نکته: در سیستم‌های سببی (واقعی) شروط زیر برقرار است:

$$\begin{array}{ll} \text{گسسته} & h[n] = 0 \quad n < 0 \\ \text{پیوسته} & h(t) = 0 \quad t < 0 \end{array}$$

تبدیل Z: تبدیل سیگنال گسسته $u[n]$ از رابطه زیر به دست می آید:

$$Z\{u[n]\} = u(Z) = \sum_{-\infty}^{\infty} u[n]Z^{-n}$$

نکته: در بعضی از کتابها، تعریف Z به صورت $u(z) = \sum_{-\infty}^{\infty} u[n]Z^{+n}$ آمده است.

تکلیف 6-1: تبدیل Z سیگنال گسسته زیر را به دست آورید: (ناحیه همگرایی؟)

$$x[n] = a^n u_{-1}[n]$$

تکلیف 6-2: تبدیل Z سیگنال گسسته زیر را به دست آورید: (ناحیه همگرایی؟)

$$x[n] = -a^n [-n-1]$$

تکلیف 6-3: مطلوب است تبدیل Z سیگنال زیر و ناحیه همگرایی آن:

$$x[n] = \left(\frac{i}{2}\right)^n u_{-1}[n] + \left(\frac{1}{3}\right)^n u_{-1}[n]$$

خواص تبدیل Z

1- تبدیل Z یک تبدیل خطی است

$$Z\{\alpha_1 x_1[n] + \alpha_2 x_2[n]\} = \alpha_1 Z\{x_1[n]\} + \alpha_2 Z\{x_2[n]\}$$

2- خاصیت انتقال

$$\begin{aligned} Z\{x[n+1]\} &= Zx(Z) - Zx[0] \\ Z\{x[n-1]\} &= Z^{-1}x(Z) + x(-1) \end{aligned}$$

3- قضیه مقدار نهایی

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x[n] = \lim_{Z \rightarrow 1} (1 - Z^{-1})x(z)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{S \rightarrow 0} SF(s)$$

در حوزه S:

4- قضیه مقدار ابتدایی

$$\lim_{X \rightarrow \infty} X(Z) = \lim_{n \rightarrow 0} x[n]$$

تکلیف 6-4: معادله تفاضلی زیر را حل کنید:

$$\begin{aligned} u[n] - 2u[n-1] &= e[n-1] & u[n] &=? \\ \begin{cases} e[n] = 4u_{-1}[n] \\ u[0] = 1 \\ e[-1] = 0 \end{cases} \end{aligned}$$

جدول حوزه S

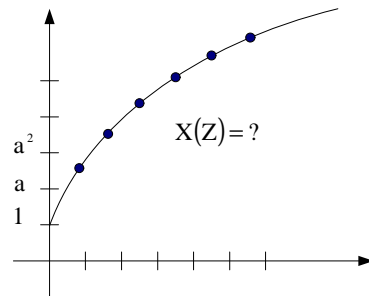
نام سیگنال	در حوزه زمان	در حوزه لاپلاس
ضربه واحد	$u(t) = u_0(t) = \delta(t)$	$U(S) = 1$
پله واحد	$u(t) = u_{-1}(t)$	$U(S) = \frac{1}{S}$
شیب واحد	$u(t) = u_{-2}(t) = tu_{-1}(t)$	$U(S) = \frac{1}{S^2}$

جدول حوزه Z

نام ورودی		در حوزه Z
ضربه واحد	$u_0[n] = \begin{cases} 1 & n=0 \\ 0 & n \neq 0 \end{cases}$	$u(Z) = 1$
پله واحد	$u_{-1}[n]$	$u(Z) = \frac{Z}{Z-1}$
شیب واحد (سرعت)	$u_{-2}[n]$	

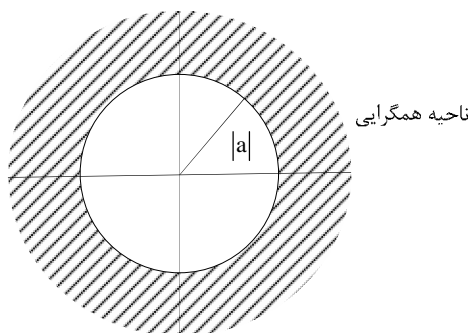
مثال: تبدیل Z سیگنال $x[n] = a^n u_{-1}[n]$

$$Z\{x[n]\} = X(Z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]Z^{-n} = \sum_{n=0}^{\infty} a^n u[n]Z^{-n} = \sum_{n=0}^{\infty} (az^{-1})^n = 1 + az^{-1} + a^2Z^{-2} + \dots$$



می‌دانیم سری $1 + a + a^2 + \dots$ وقتی $|a| < 1$ باشد، همگرا است و برابر $\frac{1}{1-a}$ می‌باشد.

$|aZ^{-1}| < 1 \Rightarrow |Z| > a$ اگر :



ناحیه همگرایی $\Rightarrow X(Z) = \frac{Z}{Z-a}$
 قسمت هاشه، ده

مثال: تبدیل Z سیگنال زیر را به دست آورید:

$$x[n] = -a^n u_{-1}[-n-1]$$

$$X(Z) = \sum_{-\infty}^{\infty} -a^n u_{-1}[-n-1] Z^{-n} = \sum_{-\infty}^{-1} -a^n Z^{-n} = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} a^n Z^n = 1 - \frac{1}{a^{-1}Z}$$

ناحیه همگرایی در داخل دایره‌ای به شعاع $|a|$ است.

$$X(Z) = \frac{Z}{Z-a}$$

نکته 1: سیگنال‌های مختلف ممکن است در حوزه Z دارای یک مقدار باشند ولی ناحیه همگرایی آنها متفاوت باشد.

نکته 2: ناحیه همگرایی تبدیل Z هر شکل دلخواه نیست. معمولاً حلقه‌هایی هستند به مرکز صفحه Z و در ناحیه همگرایی هیچگاه قطب تبدیل Z وجود ندارد.

معکوس تبدیل Z

هدف پیدا کردن سیگنال گسسته $x[n]$ از روی تبدیل Z آن $X(Z)$ و ناحیه همگرایی می‌باشد و به سه روش زیر معکوس تبدیل Z به دست می‌آید.

$$\{X(Z)\}^{-1} = u[n]$$

- 1- تجزیه تابع به کسرهای جزء
- 2- بسط تابع Z بر حسب توان‌های Z یا Z^{-1}
- 3- روش مانده‌ها

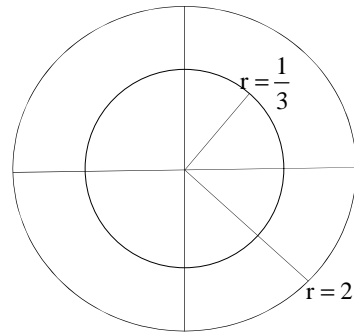
مثال: معکوس تبدیل Z تابع زیر را بر حسب فواصل همگرایی به دست آورید.

$$X(Z) = \frac{1}{\left(1 - \frac{1}{3}Z^{-1}\right)(1 - 2Z^{-1})} = \frac{Z^2}{\left(Z - \frac{1}{3}\right)(Z - 2)}$$

الف - ناحیه همگرایی داخل دایره کوچک به شعاع $r_1 = \frac{1}{3}$

ب - ناحیه همگرایی بین دو دایره به شعاع $r_1 = \frac{1}{3}$ و $r_2 = 2$

ج - ناحیه همگرایی خارج دایره به شعاع $r_2 = 2$



$$X(Z) = \frac{-\frac{1}{5}Z}{Z - \frac{1}{3}} + \frac{\frac{6}{5}Z}{Z - 2} = \frac{-\frac{1}{5}}{1 - \frac{1}{3}Z^{-1}} + \frac{\frac{6}{5}}{1 - 2Z^{-1}}$$

در حالت الف)

$$x[n] = \left(-\frac{1}{3}\right)^n u_{-1}[-n-1] \times \left(-\frac{1}{5}\right) - (2)^n u_{-1}[-n-1] \times \frac{6}{5}$$

در حالت ب)

$$x[n] = \left(\frac{1}{3}\right)^n u_{-1}[n] \times \frac{1}{5} - (2)^n u_{-1}[-n-1] \times \frac{6}{5}$$

در حالت ج)

$$x[n] = \left(\frac{1}{3}\right)^n u_{-1}[n] \times \frac{1}{5} + (2)^n \frac{6}{5} u_{-1}[n]$$

مثال: معادله تفاضلی زیر را حل کنید.

$$u[n] - 2u[n-1] = e[n-1]$$

$$\begin{cases} e[n] = 4^n u_{-1}[n] \\ e[-1] = 0 \\ u[0] = 1 \end{cases}$$

$$u[0] - Z u[-1] = 0$$

اگر در معادله $n=0$ باشد:

$$U(Z) - 2\{Z^{-1}U(Z) + u[0]\} = Z^{-1} \times \frac{1}{1-4Z^{-1}}$$

$$U(Z) = \frac{\frac{Z^{-1}}{1-4Z^{-1}}}{1-2Z^{-1} - 2u[-1]}$$

$$U(Z) = \frac{1}{1-2Z^{-1}} + \frac{Z^{-1}}{(1-2Z^{-1})(1-4Z^{-1})}$$

$$U(Z) = \frac{1/2}{1-2Z^{-1}} + \frac{1/2}{1+4Z^{-1}}$$

$$u[n] = \frac{1}{2}(4)^n u_{-1}[n] + \frac{1}{2}(2)^n u_{-1}[n]$$

$$u_n[n] = \frac{1}{2}(4)^n + \frac{1}{2}(2)^n \quad n \geq 0$$

ادامه مطالعات حالت گذرا در حوزه Z

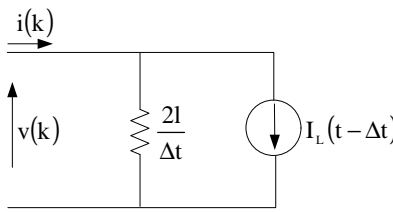
با توجه به مدل گسسته عناصر شبکه، شامل عناصر فشرده L ، R و C و عنصر گسترده خط انتقال از روابط حاکم بر عناصر Z گرفته و آنها را به حوزه Z می‌بریم. آنگاه با توجه به مدار شبکه، معادلات گره حاکم بر شبکه در حوزه Z را استخراج می‌کنیم.

در روش‌های گسسته به علت وجود حلقه‌های تکرار سرعت محاسبات کم ولی در روش مستقیم حوزه Z با عکس Z گرفتن می‌توان به سادگی ولتاژ گره‌ها را در حالت گذرا به دست آورد.

معادل عناصر فشرده در حوزه Z

1- مدل سلف در حوزه Z

می‌دانیم مدل گسسته سلف عبارت است از:

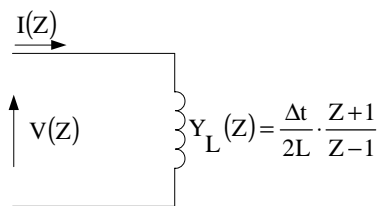


$$i(k) = \frac{v(k)}{\frac{2L}{\Delta t}} + \left[i(k-1) + \frac{v(k-1)}{\frac{2L}{\Delta t}} \right] \quad (1)$$

با توجه به رابطه (1) با شرایط اولیه صفر، آن را در حوزه Z می‌بریم:

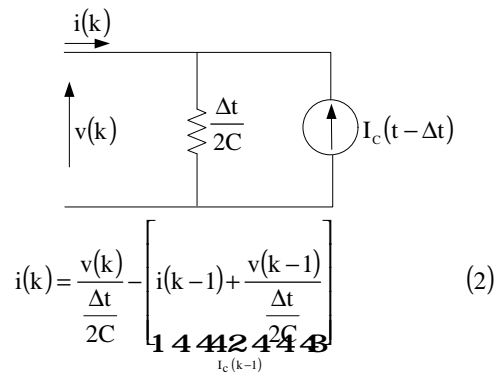
$$I(Z) = \frac{V(Z)}{\frac{2L}{\Delta t}} + Z^{-1} I(Z) + Z^{-1} \frac{V(Z)}{\frac{2L}{\Delta t}}$$

$$Y_L(Z) = \frac{I(Z)}{V(Z)} \quad Y_L(Z) = \frac{\Delta t}{2L} \cdot \frac{Z+1}{Z-1}$$



2- مدل خازن در حوزه Z

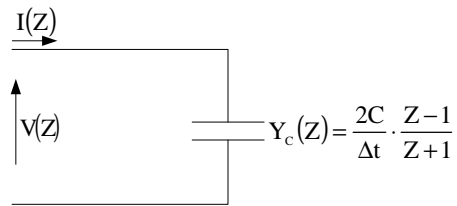
می‌دانیم مدل گسسته خازن عبارت است از:



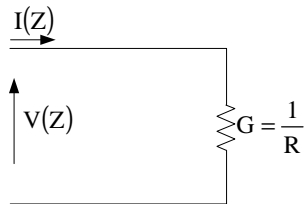
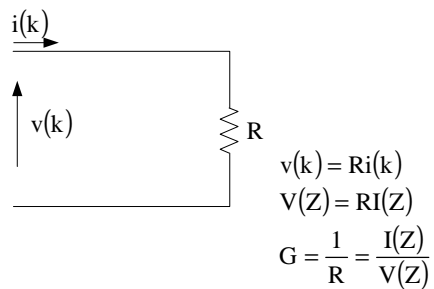
با توجه به رابطه (2) با شرایط اولیه صفر، آن را به حوزه Z می‌بریم:

$$I(Z) = \frac{V(Z)}{\frac{\Delta t}{2C}} - \left[Z^{-1}I(Z) + Z^{-1} \frac{V(Z)}{\frac{\Delta t}{2C}} \right]$$

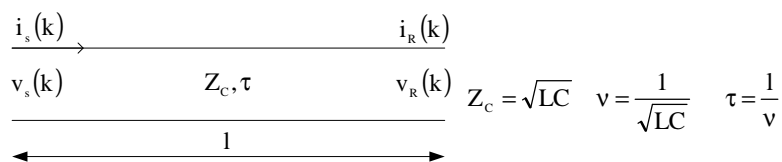
$$Y_c(Z) = \frac{V(Z)}{I(Z)} = \frac{2C}{\Delta t} \cdot \frac{Z-1}{Z+1}$$



3- مدل مقاومت اهمی در حوزه Z



4- مدل خط انتقال تکفاز بدون تلفات در حوزه Z



مدل گسسته خط فوق عبارت است از:

$$(1) \begin{cases} i_s(t) = \frac{1}{Z_c} v_s(t) + I_s(t-\tau) \\ I_s(t-\tau) = i_r(t-\tau) - \frac{1}{Z_c} v_s(t-\tau) \end{cases}$$

$$(2) \begin{cases} i_r(t) = I_r(t-\tau) - \frac{1}{Z_c} v_r(t) \\ I_r(t-\tau) = i_s(t-\tau) + \frac{1}{Z_c} v_s(t-\tau) \end{cases}$$

می‌توانیم Δt در خازن و سلف را طوری انتخاب کنیم که در رابطه $m, \tau = m\Delta t$ یک عدد صحیح باشد. لذا داریم: $t - \tau = k\Delta t - m\Delta t = (k - m)\Delta t$

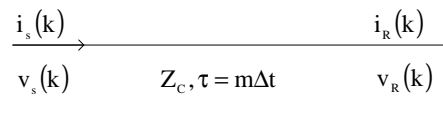
روابط (1) و (2) را به صورت زیر می‌نویسیم.

$$(1') \quad i_s(t) = \frac{1}{Z_c} v_s(t) + i_r(t-\tau) - \frac{1}{Z_c} v_s(t-\tau)$$

$$(2') \quad i_r(t) = i_s(t-\tau) + \frac{1}{Z_c} v_s(t-\tau) - \frac{1}{Z_c} v_r(t)$$

حال روابط (1') و (2') را به صورت گسسته می‌نویسیم:

$$\begin{cases} i_s(k) = \frac{1}{Z_c} v_s(k) + i_r(k-m) - \frac{1}{Z_c} v_s(k-m) & (1'') \\ i_r(k) = i_s(k-m) + \frac{1}{Z_c} v_s(k-m) - \frac{1}{Z_c} v_r(k) & (2'') \end{cases}$$



در حوزه Z ، روابط (1'') و (2'') عبارت است از:

$$\begin{cases} I_s(Z) = \frac{1}{Z_c} V_s(Z) + Z^{-m} I_r(Z) - \frac{1}{Z_c} Z^{-m} V_s(Z) \\ I_r(Z) = Z^{-m} I_s(Z) + \frac{1}{Z_c} \cdot Z^{-m} V_s(Z) - \frac{1}{Z_c} V_r(Z) \end{cases}$$

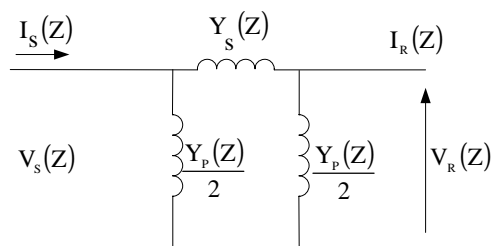
$$\begin{bmatrix} V_s(Z) \\ I_s(Z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(Z) & B(Z) \\ C(Z) & D(Z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r(Z) \\ I_r(Z) \end{bmatrix}$$

$$A(Z) = D(Z) = \frac{Z^{-m} + Z^m}{2}$$

$$B(Z) = \frac{Z_c(Z^m - Z^{-m})}{2}$$

$$C(Z) = \frac{Z^m - Z^{-m}}{2Z_c}$$

معادل Π خط در حالت گذرا در حوزه Z :



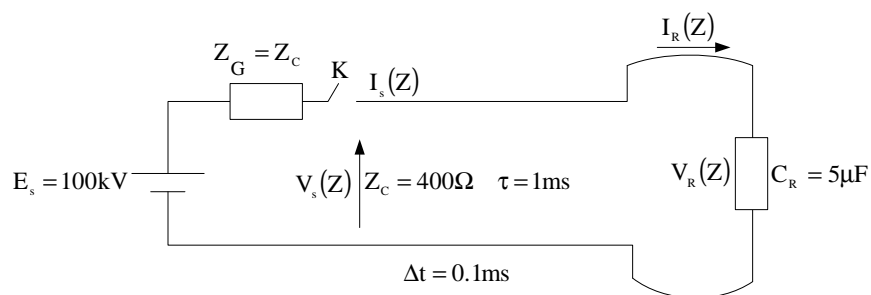
$$Y_s(Z) = \frac{2Z^m}{Z_c(Z^{2m} - 1)}$$

$$Y_p(Z) = \frac{(Z^m - 1)^2}{Z_c(Z^{2m} - 1)}$$

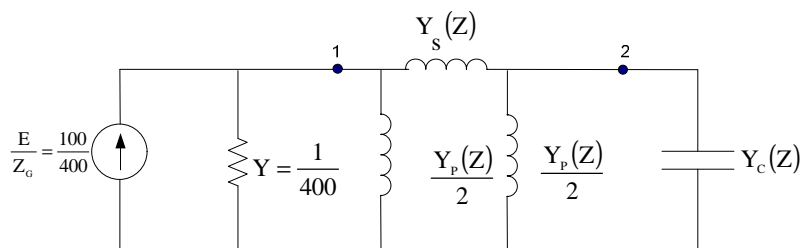
همچنین داریم:

$$\begin{bmatrix} V_r(Z) \\ I_r(Z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(Z) & B(Z) \\ C(Z) & D(Z) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_s(Z) \\ I_s(Z) \end{bmatrix}$$

تکلیف 7-1: شبکه تکفاز زیر مفروض است:



مطلوب است محاسبه ولتاژ اول و آخر خط پس از بستن کلید K در حوزه Z. (خازن و خط قبل از برقرار کردن، شارژی نداشته است).
مدار معادل شبکه فوق، در حوزه Z عبارت است از:



$$[Y][V] = [I]$$

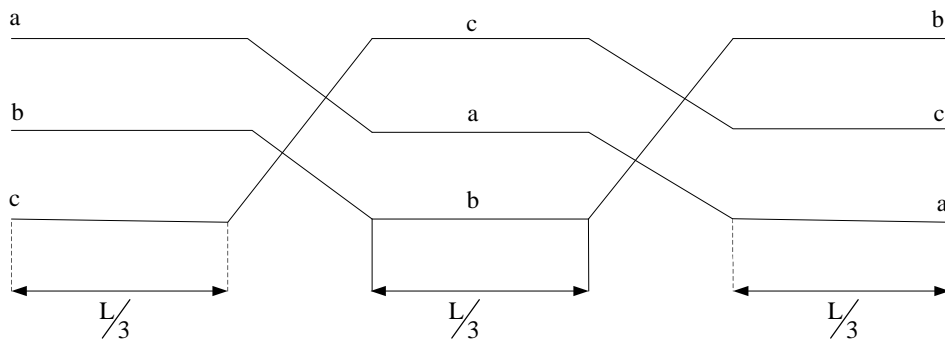
$$\begin{bmatrix} \frac{1}{400} + \frac{Y_p(Z)}{2} + Y_s(Z) & -Y_s(Z) \\ -Y_s(Z) & Y_c(Z) + \frac{Y_p(Z)}{2} + Y_s(Z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1(Z) \\ V_2(Z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$V_1(Z) = f(Z) \quad , \quad V_2(Z) = g(Z)$$

بررسی حالت گذرا در سیستم‌های چند فازه

الف - سیستم سه فاز بدون تلفات

یک سیستم سه فاز بدون تلفات که ترانسپوز شده است را در نظر بگیرید:



که ماتریس اندوکتانس و کاپاسیتانس آن عبارت است از:

$$\underline{L} = \begin{bmatrix} L_s & L_m & L_m \\ L_m & L_s & L_m \\ L_m & L_m & L_s \end{bmatrix} \quad H/m \quad \underline{C} = \begin{bmatrix} C_s & C_m & C_m \\ C_m & C_s & C_m \\ C_m & C_m & C_s \end{bmatrix} \quad F/m$$

محاسبه \underline{L} , \underline{C} با توجه به آرایش سر دکل قابل محاسبه است.

$$\begin{cases} \underline{L}_m \cdot \\ \underline{L}_s \cdot \\ \underline{C}_s \cdot \\ \underline{C}_m \cdot \end{cases}$$

توجه کنید: برای یک سیستم n سیمه دارای n مد انتشار و n سرعت انتشار و n امپدانس مشخصه خواهیم دید برای

یک خط سه سیمه دارای سه مد انتشار با سه سرعت انتشار و سه امپدانس مشخصه روبرو هستیم که به

آنها مد صفر و مد مثبت و مد منفی می‌گویند.

$$\overset{\circ}{V}, \overset{+}{V}, \overset{-}{V} \quad - \quad \overset{\circ}{Z}_c, \overset{+}{Z}_c, \overset{-}{Z}_c$$

بحث فوق در رابطه با تئوری مودال می‌باشد.

نکته: تئوری مودال در جبر خطی جهت حل دستگاه‌های معادلات دیفرانسیل که با هم تزویج دارند برای مجزاسازی برای مجزاسازی از یک تبدیل استفاده کرده و از وارون آن جهت به دست آوردن مقادیر واقعی استفاده می‌شود.

در ادامه معادلات دیفرانسیل حاکم بر خط سه فاز ترانسپوز شده را می‌نویسیم و آن را با توجه به شرایط مرزی حل می‌کنیم.

$$\begin{cases} \frac{d\underline{V}(X,S)}{dX} = -\underline{S}\underline{L}\underline{I}(X,S) \\ \frac{d\underline{I}(X,S)}{dX} = -\underline{S}\underline{C}\underline{V}(X,S) \end{cases} \quad (1)$$

که در آن:

$$\underline{V}(X,S) = \begin{bmatrix} V_a(X,S) \\ V_b(X,S) \\ V_c(X,S) \end{bmatrix}, \quad \underline{I}(X,S) = \begin{bmatrix} I_a(X,S) \\ I_b(X,S) \\ I_c(X,S) \end{bmatrix}$$

ماتریس اندوکتانس $\underline{L} = [3 \times 3]$

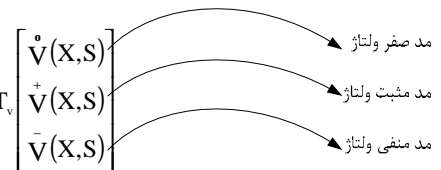
ماتریس کاپاسیتانس $\underline{C} = [3 \times 3]$

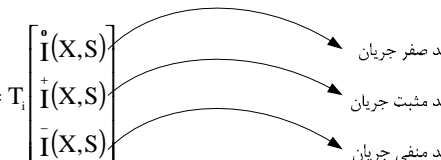
ماتریس تبدیل مودال ولتاژ و جریان (بعدا" در مورد نحوه محاسبه آن توضیح داده می‌شود) را در نظر بگیرید:

$$\underline{T}_v = \underline{T}_i = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \quad \underline{T}_v^{-1} = \underline{T}_i^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

نکته: این ماتریس‌ها یکتا نمی‌باشند.

داریم:

$$\begin{bmatrix} V_a(X,S) \\ V_b(X,S) \\ V_c(X,S) \end{bmatrix} = \underline{T}_v \begin{bmatrix} \overset{\circ}{V}(X,S) \\ \overset{+}{V}(X,S) \\ \overset{-}{V}(X,S) \end{bmatrix} \quad (2)$$


$$\begin{bmatrix} I_a(X,S) \\ I_b(X,S) \\ I_c(X,S) \end{bmatrix} = \underline{T}_i \begin{bmatrix} \overset{\circ}{I}(X,S) \\ \overset{+}{I}(X,S) \\ \overset{-}{I}(X,S) \end{bmatrix} \quad (3)$$


روابط (2) و (3) را به صورت بسته زیر می‌نویسیم:

$$\underline{V}(X,S) = T_v V_m(X,S) \quad (4)$$

$$\underline{I}(X,S) = T_i I_m(X,S) \quad (5)$$

با قرار دادن روابط (4) و (5) در (1) داریم:

$$\begin{cases} T_v \frac{dV_m(X,S)}{dX} = -SLT_i I_m(X,S) \\ T_i \frac{dI_m(X,S)}{dX} = -SCT_v V_m(X,S) \end{cases} \quad (6)$$

با ساده کردن روابط (6) داریم:

$$\begin{cases} \frac{dV_m(X,S)}{dX} = -S(T_v^{-1}LT_i)I_m(X,S) \\ \frac{dI_m(X,S)}{dX} = -S(T_i^{-1}CT_v)V_m(X,S) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dX} \begin{bmatrix} \dot{V}(X,S) \\ \dot{V}^+(X,S) \\ \dot{V}^-(X,S) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -S(L_s + 2L_m) & 0 & 0 \\ 0 & -S(L_s - L_m) & 0 \\ 0 & 0 & -S(L_s - L_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}(X,S) \\ \dot{I}^+(X,S) \\ \dot{I}^-(X,S) \end{bmatrix} \\ \frac{d}{dX} \begin{bmatrix} \dot{I}(X,S) \\ \dot{I}^+(X,S) \\ \dot{I}^-(X,S) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -S(C_s + 2C_m) & 0 & 0 \\ 0 & -S(C_s - C_m) & 0 \\ 0 & 0 & -S(C_s - C_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}(X,S) \\ \dot{V}^+(X,S) \\ \dot{V}^-(X,S) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (8)$$

روابط (8) را می‌توان به سه دسته مسئله مستقل تبدیل کرد.

$$\text{مد صفر} \begin{cases} \frac{d \dot{V}(X,S)}{dX} = -S(L_s + 2L_m) \dot{I}(X,S) \\ \frac{d \dot{I}(X,S)}{dX} = -S(C_s + 2C_m) \dot{V}(X,S) \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{مد مثبت} \begin{cases} \frac{d \dot{V}(X,S)}{dX} = -S(L_s - L_m) \dot{I}(X,S) \\ \frac{d \dot{I}(X,S)}{dX} = -S(C_s - C_m) \dot{V}(X,S) \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{مد منفی} \begin{cases} \frac{d \bar{V}(X,S)}{dX} = -S(L_s - L_m) \bar{I}(X,S) \\ \frac{d \bar{I}(X,S)}{dX} = -S(C_s - C_m) \bar{V}(X,S) \end{cases} \quad (11)$$

روابط (9)، (10) و (11) مربوط به سه خط تک فاز بدون تلفات مد صفر، مد مثبت و مد منفی است که با توجه به شرایط مرزی مودال به یکی از روش‌های حل حالت گذرای خط بدون تلفات یعنی:

1- روش لاپلاس

2- روش بیولی

3- روش برژرون

4- روش تبدیل Z

آن را حل کرده و مقادیر مدهای جریان و ولتاژ در هر نقطه را به دست می‌آوریم. آنگاه با توجه به وارون تبدیل، مقدار واقعی حالت گذرا در فضای c,b,a را محاسبه می‌کنیم. یعنی:

$$\begin{bmatrix} V_a(X,S) \\ V_b(X,S) \\ V_c(X,S) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}(X,S) \\ \dot{V}^+(X,S) \\ \bar{V}(X,S) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_a(X,S) \\ I_b(X,S) \\ I_c(X,S) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}(X,S) \\ \dot{I}^+(X,S) \\ \bar{I}(X,S) \end{bmatrix}$$

به عنوان مثال اگر بخواهیم از روشی استفاده کنیم که نیاز به سرعت انتشار و امپدانس مشخصه خط باشد، برای هر مد داریم:

الف - امپدانس مشخصه صفر و مثبت و منفی

$$Z_c^{\circ} = \sqrt{\frac{L_s + 2L_m}{C_s + 2C_m}} \quad Z_c^{\pm} = \bar{Z}_c = \sqrt{\frac{L_s - L_m}{C_s - C_m}}$$

ب - سرعت انتشار مد صفر و مثبت و منفی

$$\bar{v}^{\circ} = \frac{1}{\sqrt{(L_s + 2L_m)(C_s + 2C_m)}}$$

$$\bar{v}^{\pm} = \bar{v} = \frac{1}{\sqrt{(L_s - L_m)(C_s - C_m)}}$$

ب - حالت گذرا در خطوط چند فازه بی تلفات

معادلات (1) حاکم بر خطوط چند فازه را در نظر بگیرید:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \underline{V}(X, S)}{dX^2} = ZY \underline{V}(X, S) \\ \frac{d^2 \underline{I}(X, S)}{dX^2} = YZ \underline{I}(X, S) \end{cases} \quad (1)$$

که در آن:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{1n} \\ & Z_{ij} & \\ & & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad Z_{ij} = \delta_{ij} R_i + L_{ij} S \quad \begin{cases} i = j & \delta_{ij} = 1 \\ i \neq j & \delta_{ij} = 0 \end{cases}$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{1n} \\ & Y_{ij} & \\ & & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad Y_{ij} = \begin{cases} -C_{ij} S, & i \neq j \\ G_i + \sum_{m=1}^n C_{im} S, & i = j \end{cases}$$

حل معادلات (1) به یکی از روش‌های زیر انجام می‌شود:

- 1- روابط بسته لاپلاس با توجه به شرایط مرزی اول و انتهای خط با استفاده از ماتریس ضرایب
- 2- روش بیولی با توجه به ماتریس ضرایب انعکاس
- 3- روش مودال
- 4- روش ساده معادلات دو قطبی چند فازه

1- روش بسته لاپلاس

مشابه خط تک فاز ولی به صورت ماتریس

$$\underline{V}(X, S) = \underline{E}_G(S) \left[\frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_G(S) + \underline{Z}_C} \right] \left[\frac{e^{-sX/v} + \underline{\Gamma}_R(S) e^{s\left(\frac{X}{v} - 2\tau\right)}}{1 - \underline{\Gamma}_R(S) \underline{\Gamma}_S(S) e^{-2S\tau}} \right]$$

$$\underline{I}(X, S) = \frac{\underline{E}_G(S)}{\underline{Z}_G - \underline{Z}_C} \left[\frac{e^{-sX/v} - \underline{\Gamma}_R(S) e^{-s\left(\frac{X}{v} - 2\tau\right)}}{1 - \underline{\Gamma}_R(S) \underline{\Gamma}_S(S) e^{-2S\tau}} \right]$$

که در آن:

$$\underline{Z}_C = \sqrt{\frac{\underline{Z}}{Y}} = \sqrt{\underline{Z}Y^{-1}}$$



$$\underline{\Gamma}_R(S) = \frac{\underline{Z}_R - \underline{Z}_C}{\underline{Z}_R + \underline{Z}_C} = (\underline{Z}_R - \underline{Z}_C)(\underline{Z}_R + \underline{Z}_C)^{-1}$$

$\underline{\Gamma}_R(S) = I$ اگر انتهای خط باز باشد ماتریس یکه

$\underline{\Gamma}_R(S) = -I$ اگر انتهای خط اتصال کوتاه باشد

$$\underline{Z}_R = \underline{Z}_C \Rightarrow \underline{\Gamma}_R(S) = 0$$

$$\underline{\Gamma}_S(S) = \frac{\underline{Z}_G - \underline{Z}_C}{\underline{Z}_G + \underline{Z}_C} = (\underline{Z}_G - \underline{Z}_C)(\underline{Z}_G + \underline{Z}_C)^{-1}$$

- 2- روش بیولی (دیاگرام نرده‌ای) برای هر فاز (هر سیم) می‌توان دیاگرام را رسم کرد. (البته به روش کامپیوتری می‌توان این الگوریتم را دنبال کرد).
- 3- روش مودال مشابه روش گفته شده ولی برای هر سیم یک مد انتشار داریم.

نکته: در تئوری مودال برای به دست آوردن ماتریس مودال برای معادلات (1) به روش زیر انجام می‌گیرد.

$$\begin{cases} \frac{d^2V}{dX^2} = ZYV = PV = \gamma^2 V \\ \frac{d^2I}{dX^2} = YZI = P_i I = \gamma_i^2 I \end{cases}$$

$$(ZY)^T = Y^T Z^T = Y.Z$$

ماتریس مودال T_v از روی بردارهای ویژه مقادیر راست یا چپ ماتریس P به دست می‌آید.

ماتریس مودال T_i از روی بردارهای ویژه مقادیر راست یا چپ ماتریس P_i به دست می‌آید.

الگوریتم محاسبه ماتریس مودال

1- مقادیر ویژه ماتریس P را به دست می‌آوریم.

$$\det[P - \lambda I] = 0 \Rightarrow \lambda_i = \text{مقادیر ویژه}$$

2- بردار ویژه راست یا چپ مقدار ویژه λ_i را از رابطه زیر به دست می‌آوریم.

$$\lambda_i \underline{X}_i = P \underline{X}_i \Rightarrow \underline{X}_i = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix}$$

بردار ویژه راست

نکته: برای هر مقدار ویژه λ_i ، یک بردار ویژه راست X_i وجود دارد.

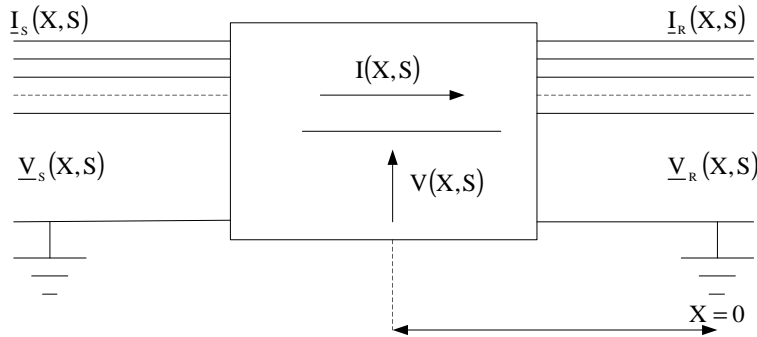
3- تشکیل ماتریس مودال T_v

از کنار هم چیدن بردارهای ویژه راست به دست می‌آید:

$$T_v = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_1 & X_2 & X_i & X_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

راهنمایی: جهت به دست آوردن ماتریس مودال به کتب جبر خطی یا کنترل مدرن مراجعه شود.

4- روش معادلات چند قطبی خط
شکل زیر را در نظر بگیرید:



$$\begin{bmatrix} \underline{V}(X,S) \\ \underline{I}(X,S) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Cosh}\underline{\gamma X} & \underline{Z}_c \text{Sinh}\underline{\gamma X} \\ \underline{Z}_c^{-1} \text{Sinh}\underline{\gamma X} & \text{Cosh}\underline{\gamma X} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_r(S) \\ \underline{I}_r(S) \end{bmatrix}$$

که در آن:

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{\underline{Z}}{\underline{Y}}} = \sqrt{\underline{ZY}^{-1}}, \quad \underline{\gamma} = \sqrt{\underline{ZY}}$$

توجه کنید با در دست داشتن ولتاژ و جریان آخر خط در حالت گذرا می‌توان ولتاژ و جریان در حالت گذرا در هر نقطه خط را به دست آورد.
در حالت خاص وقتی $X=l$ است داریم:

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_s(X,S) \\ \underline{I}_s(X,S) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Cosh}\underline{\gamma l} & \underline{Z}_c \text{Sinh}\underline{\gamma l} \\ \underline{Z}_c^{-1} \text{Sinh}\underline{\gamma l} & \text{Cosh}\underline{\gamma l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_r(S) \\ \underline{I}_r(S) \end{bmatrix} = I(\text{طول خط})$$

تکلیف 8-1: با توجه به پارامترهای یکی از خطوط کشور مطلوب است محاسبه ولتاژ و جریان گذرا در هر نقطه خط در هنگام برقرار کردن خط از یک منبع شین بی‌نهایت در حالتی که آخر خط باز است.
اثبات رابطه فوق از طریق روابط بسته لاپلاس در خطوط چند فازه به دست می‌آید.

تکلیف 8-2: مقاله ضمیمه در رابطه با خط تکفاز با تلفات به صورت گسترده به روش تبدیل فوریه می‌باشد. مطالعه و ترجمه نمائید. کاربرد این مقاله در اتصال اجزاء یک IC می‌باشد که در فرکانس‌های بالا کار می‌کند.

اثرات پارامترهای مختلف شبکه بر روی مقدار اضافه ولتاژ ناشی از کلیدزنی (Closing)

مقدمه: در مورد انرژی دار کردن یک خط از یک منبع دیدیم اضافه ولتاژ ماکزیمم وقتی حاصل می شود که انتهای خط باز باشد و تا دو برابر ولتاژ اعمالی، ولتاژ آخر خط بالا می رفت. حال می خواهیم عواملی که سبب می شود اضافه ولتاژها از این مقدار بیشتر شود، چیست. این عوامل عبارتند از:

1- نوع منبع که خط از طریق آن برقرار می شود.



الف - مولد



ب - خط



ج - شین بی نهایت

2- طول خط طول بیشتر اضافه ولتاژ Length of line to be energizing بیشتر

3- جبران قدرت راکتیو در خط Reactive Compensation

4- بسته نشدن همزمان سه فاز Non simultaneous closure of three phase

5- بار ذخیره شده در خط و شیب و افت آن Trapped charge on the line and its rate of decay

6- تلفات سیستم در مقاومت خط و کندوکتانس خط (G,R) که باعث تضعیف (attenuation) و تغییر شکل distortion اضافه System loss ولتاژ می شود.

7- وضعیت آخر خط Line termination

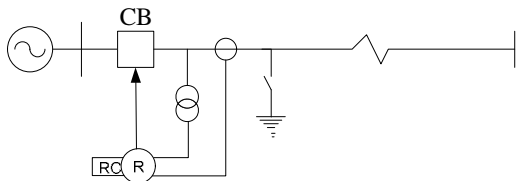
تکلیف 1: عوامل ایجاد اضافه ولتاژها در شبکه های توزیع و فوق توزیع و انتقال و روش های کاهش آن جهت حمایت عایقی شبکه

تکلیف 2: ضرورت دانش بررسی حالت گذرا در شبکه جهت کمپکت کردن خطوط انتقال و کمپکت کردن خطوط 20 کیلوولت شهری

قبل از تشریح موارد فوق و ادامه بحث، چند نکته مهم زیر ضروری است:

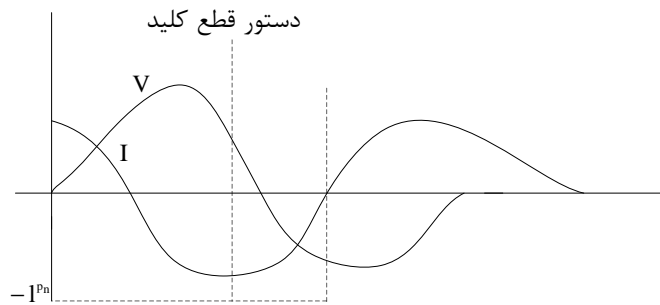
نکته اول - استفاده از سکسیونر زمین در کلیدهای مجهز به رله وصل مجدد (Recloser)

شکل زیر را در نظر بگیرید:

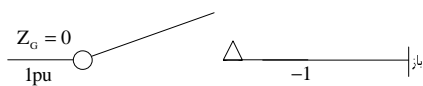


در مقابل خطاهای گذرا کلید باز شده و توسط رله وصل مجدد خط برقرار می‌شود. در حین این عمل اگر سکسیونر بار خط را تخلیه کند خواهیم دید اضافه ولتاژ کمتر از وقتی است که بار تخلیه نشده باشد.

نکته: ثابت زمانی تخلیه خط در مناطق خشک، دقیقه $\tau = RC = 20$ و در مناطق مرطوب دقیقه $\tau = RC = 3-5$ اگر بار ذخیره در هنگام باز شدن خط $-1pu$ باشد ($Q = CV$) و آن وقتی است که دژنکتور جریان آن نسبت به ولتاژ 90° جلوتر باشد. چون کلید در جریان صفر قطع می‌کند داریم:



حال اگر کلید توسط رله وصل مجدد دستور بستن را صادر کند:

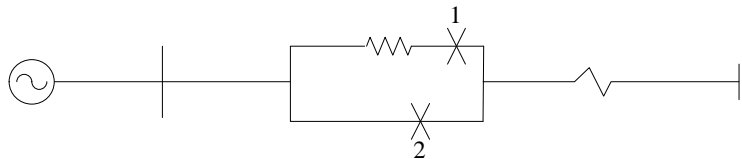


$$V_0 = 1 - (-1) = 2pu$$

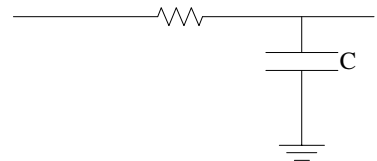
ولتاژ تابشی اولیه برابر 2pu می‌باشد و اضافه ولتاژهای آخر خط به 3pu می‌رسد.

نکته دوم: مقاومت Closing جهت کاهش اضافه ولتاژ در کلیدهای دژنکتور

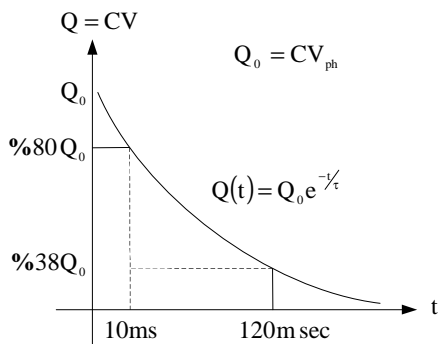
برای جلوگیری از ازدیاد ولتاژ در عمل برقرار کردن خطوط، یک مقاومت اهمی درون کلید مطابق شکل زیر تعبیه می‌گردد. به طوری که ابتدا مقاومت وارد مدار شده و کلید (1) بسته می‌شود و بعد از مدتی مقاومت از مدار خارج می‌گردد. (bypass) توسط کلید (2)



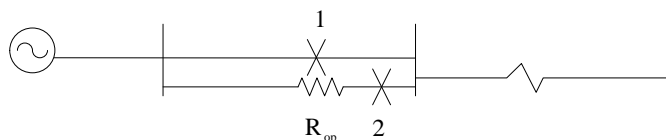
نکته سوم: شیب افت بار به دام افتاده در خطوط



$$\tau = R_0 C \quad R_0 = R + R_{\text{opening}} \quad R_0 = 25k\Omega, \quad C = 5\mu F, \quad \tau = R_0 C = 125ms$$

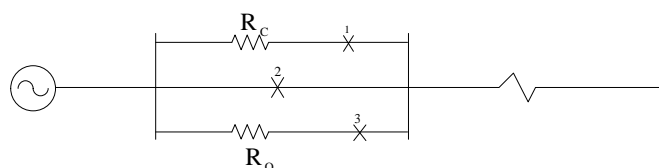


در کلیدها معمولاً "یک مقاومت Opening جهت تخلیه بار به دام افتاده نصب می‌شود. (مطابق شکل زیر)



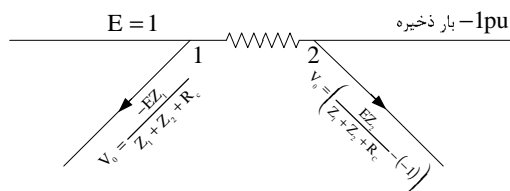
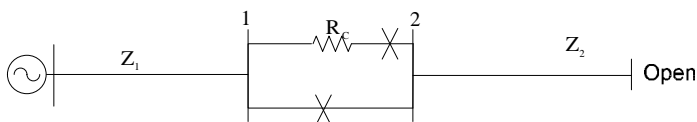
توجه: مقاومت Closing در حد چند صد اهم ولی مقاومت Opening چندین کیلو اهم است.

مثال: $R_{Closing} = 600\Omega$
 $R_{Opening} = 20k\Omega$

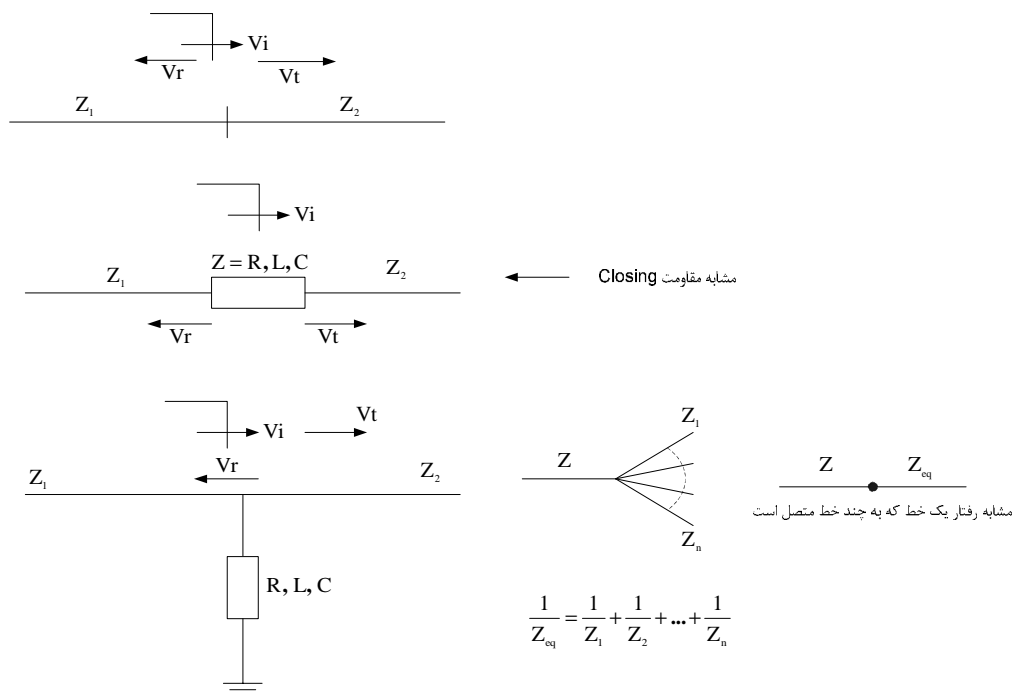


ضرورت کلیدهای دژنکتور مجهز به مقاومت Opening و مقاومت Closing در خطوط Compact

نکته چهارم: با توجه به حضور مقاومت Closing ولتاژ تابشی در شکل زیر برای محاسبه اضافه ولتاژها به روش بیولی از رابطه داده شده استفاده می‌شود.



نکته پنجم: ضرائب انعكاس و عبور در محل دو خط يا خط و كابل با حضور عناصر سري و موازي

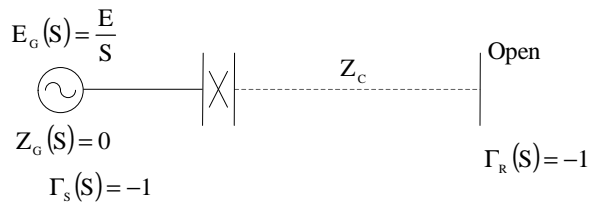


نکته مهم: در طراحی عایقی شبکه، در خطوط زیر 230 کیلوولت، اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه اساس طراحی عایقی است و برای خطوط بالای 230 کیلوولت، اساس طراحی عایقی بر مبنای اضافه ولتاژهای ناشی از سوئیچینگ می باشد.

ارائه بحث اثرات پارامترهای مختلف شبکه بر روی مقدار اضافه ولتاژ ناشی از کلیدزنی
 در برقرار کردن خطوط انتقال نیرو (Closing)

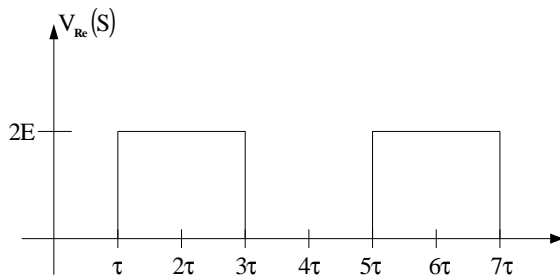
1- اثر نوع منبع

الف - امثدانس منبع صفر باشد (خط از شین بی نهایت برقرار شود)



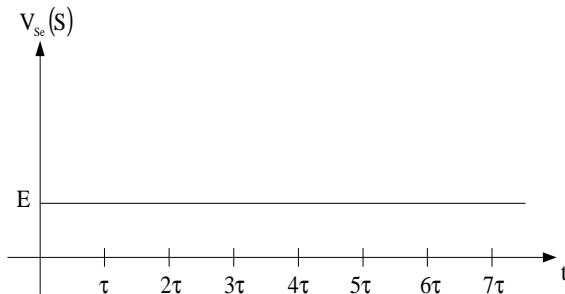
$$V_r(s) = \sum V_i + V_r$$

شکل



$$T = 4\tau \Rightarrow f = \frac{1}{T} = \frac{1}{4\tau}$$

$$Z = \frac{1}{v}, \quad v = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad f = \frac{1}{4\sqrt{LC}}$$



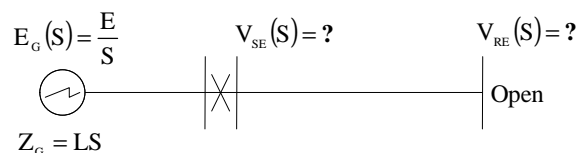
ب - منبع دارای اندوکتانس باشد:

$$Z_G(s) = LS$$

$$\Gamma_s(s) = \frac{Z_G(s) - Z_c}{Z_G(s) + Z_c} = \frac{LS - Z_c}{LS + Z_c}$$

$$V_0(s) = \frac{Z_c}{SL + Z_c} \times \frac{E}{s}$$

$$\Gamma_r(s) = 1$$



$$\Gamma_s(s) = \frac{LS - Z_c}{LS + Z_c}$$

شکل

$$V_1(s) = \Gamma_r(s)V_0(s) = V_0(s)$$

$$V_2(s) = \Gamma_s(s)V_1(s) = \Gamma_s V_0(s)$$

$$V_{RE}(t) = \sum V_i + V_r$$

$$V_0(s) = \frac{Z_c}{SL + Z_c} + \frac{E}{s} \Rightarrow V_0(t) = E \left(1 - e^{-\frac{Z_c t}{L}} \right), T = \frac{L}{Z_c}$$

$$V_0(t) = E \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

$$V_{RE}(s) = V_0(s) [2e^{s\tau} + 2\Gamma_s(s)e^{-3s\tau} + 3\Gamma_s^2(s)e^{-5s\tau} + \dots]$$

با فرض اینکه خط بلند است، دو جمله از رابطه فوق را در نظر می‌گیریم:

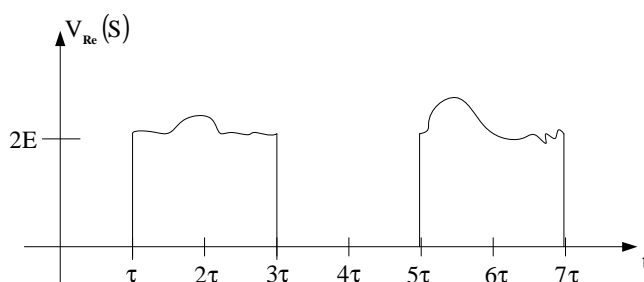
$$V_{RE}(s) = V_0(s) [2C^{-s\tau} + 2\Gamma_s(s)C^{-3s\tau}]$$

$$V_{RE}(s) = \left[\frac{ZC}{SL + Z_c} \times \frac{E}{s} \right] \left[2C^{-s\tau} + 2 \times \frac{LS - Z_c}{LS + Z_c} C^{-3s\tau} \right]$$

با وارونه کردن رابطه فوق (عکس لاپلاس) در حوزه زمان با علامت اختصاری تابع Heavy Side داریم:

$$V_{RE}(t) = 2H(t-\tau) \times E \left(1 - C \frac{Z_c}{L} e^{-\frac{Z_c}{L}(t-\tau)} \right) + 2H(t-3\tau) E \left(-1 + C \frac{Z_c}{L} e^{-\frac{Z_c}{L}(t-3\tau)} \right) \times \left(1 + \frac{2Z_c}{L} H(t-3\tau) \right)$$

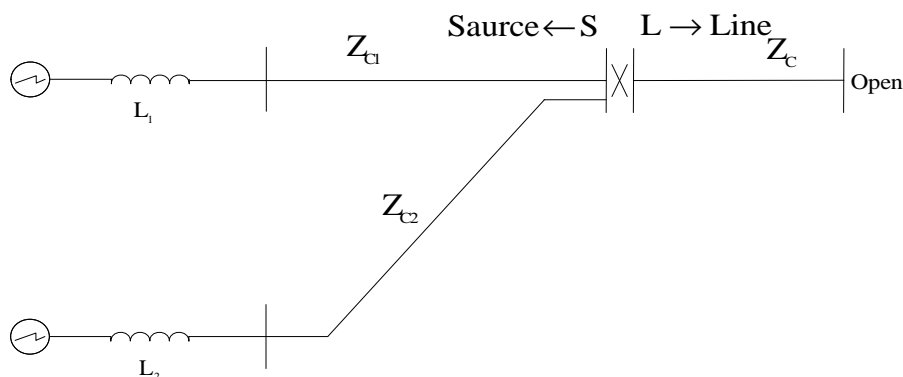
$$H(t-\tau) = \begin{cases} 0 & t \leq \tau \\ 1 & t > \tau \end{cases}, \quad H(t-3\tau) = \begin{cases} 0 & t \leq 3\tau \\ 1 & t > 3\tau \end{cases}$$



نکته: برای Z_c های مختلف و L های مختلف به طوریکه $\frac{L}{Z_c}$ یکسان باشد، اضافه ولتاژ یکی است.

نکته: در شکل های 2، 5، 6 و 7 فتوکپی ضمیمه، اگر ولتاژ $E_G(s) = 1pu$ باشد، مقدار ولتاژ V_{RE} از $2pu$ به علت وجود Hump تا حدود $2/5 pu$ تجاوز می کند و ولتاژ $V_{SE} = 1.5pu$ می رسد.

ج - خط از طریق یک پست کلیدزنی (Switching Substation) برقرار شود.



امپدانس معادل سمت چپ کلید: $Z_{eq} = Z_{c1} \parallel Z_{c2}$

اگر ولتاژ در سرکلید قبل از بستن E باشد، ولتاژ تابشی به طرف خط و منبع عبارت است از:

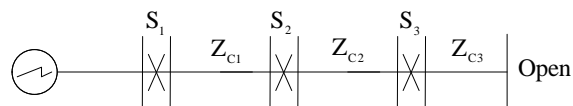
$$V_{io} = E \frac{Z_c}{Z_{eq} + Z_c} \quad , \quad Z_{so} = -E \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + Z_c}$$

دیاگرام نرده‌ای براساس این مقادیر اولیه رسم می‌کنیم.

نکته: با محاسبه فوق خواهیم دید اضافه ولتاژ در این حالت کمتر از وقتی است که یک خط از یک منبع با اندوکتانس برقرار می‌شود.

سؤال: چرا وقتی یک خط را از یک پست برقرار می‌کنیم اضافه ولتاژ آن کمتر از وقتی است که یک خط را از یک نیروگاه برقرار می‌نمائیم.

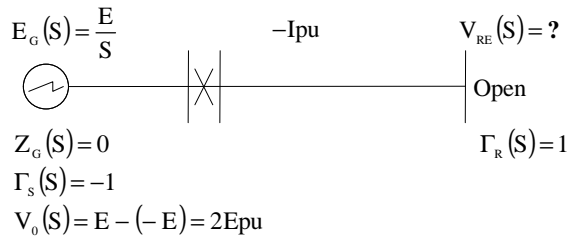
نکته: اگر چند کلید پشت سر هم داشته باشیم که از یک نیروگاه بخوایم به صورت سری چند خط را مطابق شکل زیر برقرار کنیم، آخرین کلید را دیرتر از همه می‌بندیم، چون هر چه خط بلندتر شود، اضافه ولتاژ بیشتر می‌شود.



پروژه: The best switching for Restoration of a power system قرارداد تهیه نرم‌افزار the best switching برای بازیابی شبکه پس از خاموشی سراسری بطوریکه کمترین استرس‌های اضافه ولتاژ روی سیستم عایقی شبکه اعمال شود.

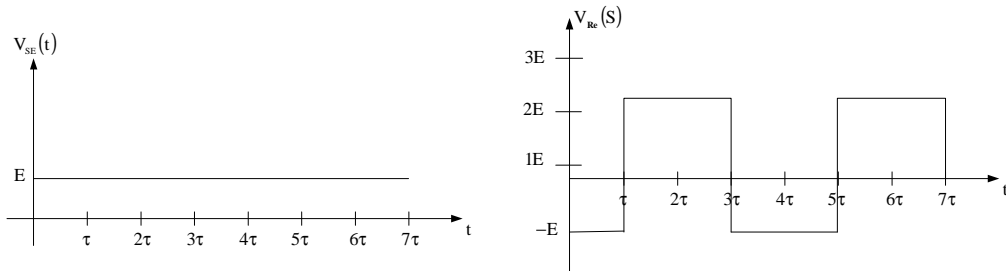
2- اثر بار ذخیره و شیب افت آن در اضافه ولتاژ آخر خط Trapped Charge

بدترین حالت وقتی است که $-Epu$ بار روی خط باشد و بخواهیم مجدداً "خط را برقرار کنیم":

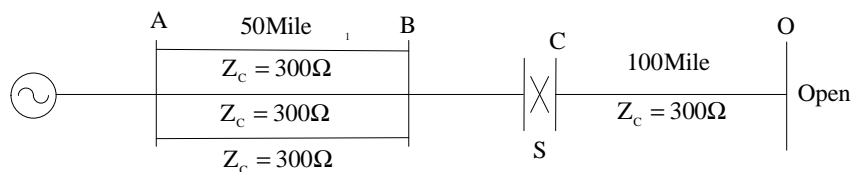


دیگرام بیولی در این حالت:

شکل



تکلیف 1-1: سؤال امتحان دانشگاه Umist در سیستم قدرت زیر مطلوب است محاسبه ولتاژ نقاط D,C,B تا زمان $1076\mu\text{s}$ تحت شرایط زیر:



(در سه حالات نقطه Balanced قبل از بستن کلید S، یک پریونیت ولتاژ دارد.)

الف - خط CD فاقد بار ذخیره است.

ب - خط CD با فاقد بار ذخیره $-Ipu$ است.

ج - خط CD فاقد بار ذخیره بوده ولی با یک مقاومت Closing برابر $400\ \Omega$ بسته می شود.

فرض کنیم سرعت موج $5.38\mu\text{Sec}/\text{miG}$ و از تغییرات $0.\text{HZ}$ صرف نظر می شود و از اثرات damp و تاثیر متقابل فازها هم صرف نظر می کنیم.

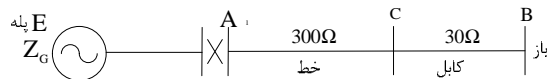
تحقیق: رله‌های سنکرونایزر ABB که حدود 20 میلیون تومان فروخته می‌شود برای کنترل دامنه ولتاژ در لحظه بستن کلید می‌باشد. با حضور این وسیله دیگر نیاز به مقاومت Opening و Closing نیست.

توصیه به قدس‌نیرو برای طراحی و ساخت این رله و به سرعت رواج دادن در بازار.

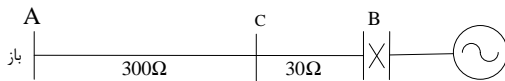
3- وضعیت انتهای خط و تاثیر روی اضافه ولتاژ

سؤال: یک خط انتقال و یک کابل مطابق شکل زیر مفروض است. سیستم را یک بار از طرف خط برقدار کرده‌ایم و بار دیگر از طرف کابل برقدار کردیم. اضافه ولتاژ در آخر سیستم در کدام حالت بیشتر است.

شکل (الف)



شکل (ب)



$$\Gamma_A = -1 \quad \Gamma_B = 1 \quad \Gamma_T = \frac{2 \times 300}{30 + 300} = 1.818 \sim 2$$

حل: در شکل الف:

$$V_A = IP^u \rightarrow V_C = 2pu \rightarrow V_B = 4p.u$$

$$V_B = IP^u \quad V_C = \frac{2 \times 30}{30 + 300} \times 1 = 0.181 Pu \quad V_A = 2 \times 0.181 = 0.4 Pu$$

حل: در شکل ب:

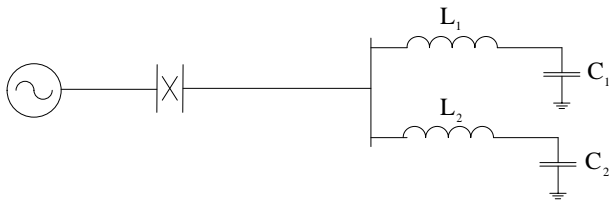
الف - حضور یک قطعه کابل در آخر خط باعث می‌شود اضافه ولتاژ آخر خط به شدت کاهش پیدا کند. کابل به مانند برقگیر عمل می‌کند. در قدیم اتصال خط به ترانسفورماتور از طریق یک قطع کابل به طول 10 الی 20 متر انجام می‌شد.

ب - تاثیر طول خط و ترانسفورماتورهای انتهای خط

شکل زیر را در نظر بگیرید:



مدار معادل شبکه فوق عبارت است از معادل کابل‌ها را خازن و معادل ترانسفورماتورها را سلف.



فرکانس طبیعی سلف و خازن ترانس‌ها و کابل‌های فیدرها:

$$f_1 = \frac{1}{2\Omega\sqrt{L_1 C_1}}$$

$$f_2 = \frac{1}{2\Omega\sqrt{L_2 C_2}}$$

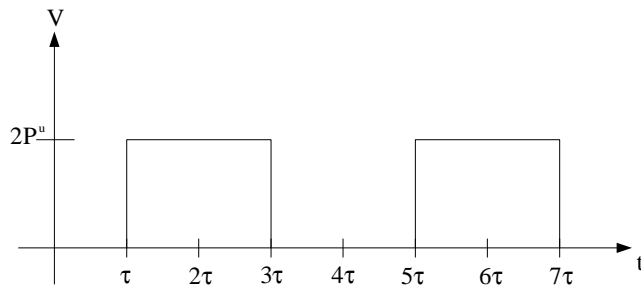
نکته: از دید خط ترانسفورماتورها و فیدرها

الف - در زمان خیلی سریع، فقط خازن دیده می‌شود.

ب - در زمان‌های سریع، سلف و خازن دیده می‌شود.

ولتاژ تحریک ترانسفورماتورها و فیدر در حالت گذرا ولتاژ انتهای خط باز با موج مربع با دامنه $2pu$ و

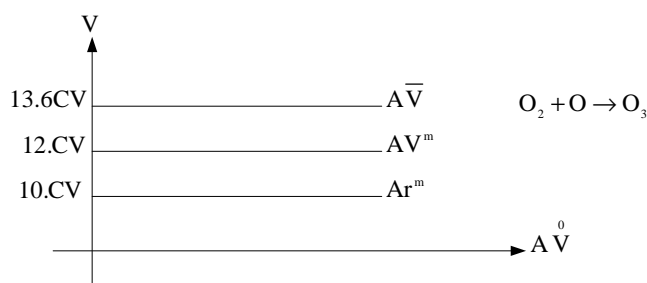
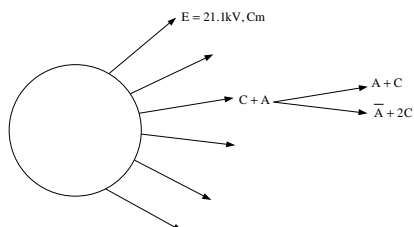
فرکانس $f = \frac{1}{4\tau}$ ($\tau = \sqrt{LC}$) است. یعنی $f = \frac{1}{4\sqrt{LC}}$.



اگر فرکانس انتهای خط f برابر فرکانس طبیعی f_1 و یا f_2 ناشی از ترانسفورماتور کابل‌های فیدرهای متصل به آن باشد، موجب تشدید شده و در شکل 15 پلی‌کپی ضمیمه نشان‌دهنده اضافه ولتاژ ناشی از حالت تشدید می‌باشد و باعث سوخت ترانسفورماتورها می‌گردد.

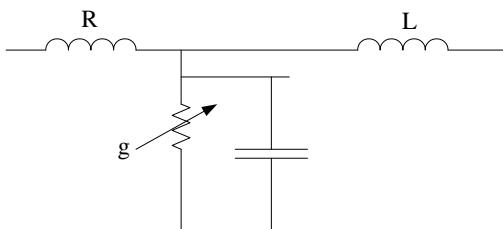
4- تلفات سیستم: مقاومت خط کرونا و کندوکتانس باعث تضعیف شکل موج اضافه ولتاژ می‌شود ولی در بعضی از موارد، باعث ازدیاد ولتاژ می‌گردد. کرونا به صورت سوپاپ اطمینان انرژی اضافه ولتاژ را تخلیه می‌کند.

تکلیف 1-11- مدل ریاضی کرونا که به صورت پلاسما انرژی تخلیه می‌گردد و در اطراف هادی وقتی شدت میدان الکتریکی سطح هادی از $E_{ms} = 21/1kV/Cm$ در شرایط متعارف بیشتر می‌شود و به صورت هاله بنفش رنگ اطراف خطوط ظاهر می‌شود و نور و صدا و تولید ارزان از عوارض آن است.



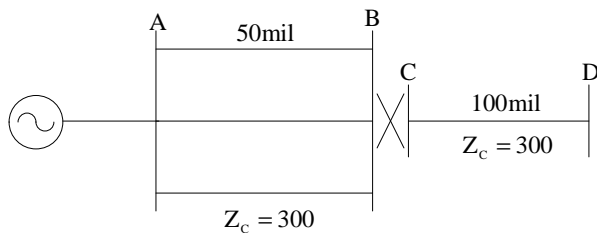
مدل میکروسکوپی براساس معادلات بولتزمن و ماکسول به دست می‌آید. مدل ماکروسکوپی به صورت معادله دیفرانسیل غیر خطی از هدایت الکتریکی می‌باشد.

$$\frac{d_g^2}{dt^2} = f(gbV)$$



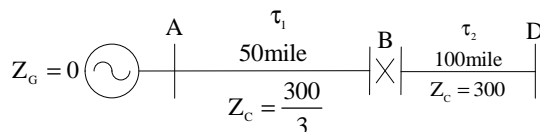
نکته: PTهای رلیاژ باعث سریع تخلیه شدن بار خط می‌شوند و چون دارای مقاومت می‌باشند، مقدار مقاومت در ثابت زمانی تخلیه اثر دارد.

حل مسئله 1-1:



الف- مطلوب است تعیین ولتاژ B، C، D، تا زمان $1076\mu S$ وقتی کلید S بسته می‌شود و در حالیکه نقطه B قبل از بسته شدن کلید ولتاژ آن $1p.u$ باشد و خط CD فاقد بار ذخیره.

هنگامی که در مسئله گفته می‌شود از تغییرات 50HZ صرف‌نظر می‌شود یعنی فقط پیک ولتاژ را در نظر بگیرید. برای انجام محاسبات به روش بیولی باید ضرایب انعکاس و عبور و زمان طی مسیر در دو خط را به دست آوریم.



$$\tau_1 = 50 \times 5.38 = 269\mu\text{Sec}$$

$$\tau_2 = 100 \times 5.38 = 538\mu\text{Sec}$$

$$Z_{eq} = \frac{Z_{AD}}{3} = \frac{300}{3} = 100\Omega$$

از سمت چپ به راست:

$$AB \left\{ \begin{array}{l} \Gamma_{RAB} = \frac{300 - 100}{300 + 100} = 0.5 \\ \Gamma_{IAB} = \frac{2 \times 300}{300 + 100} = 1.5 \end{array} \right.$$

آخر خط باز

$$CD \left\{ \begin{array}{l} \Gamma_{RDC} = \frac{100 - 300}{100 + 300} = 0.5 \\ \Gamma_{IDC} = \frac{2 \times 100}{100 + 300} = 1.5 \end{array} \right.$$

نمودار

نکته: نقطه B دارای ولتاژ Ipu است. بنابراین هنگام وصل کلید، علاوه بر اینکه ولتاژی که به خط المان می‌شود، ولتاژ به طرف منبع منعکس می‌شود.

$$V_c = \frac{300}{300+100} \times 1 = 0.75$$

$$V_B = \frac{-100}{300+100} \times 1 = 0.25$$

توجه کنید بعد از وصل کلید، ولتاژ نقطه C, B یکی شده و نقطه C ولتاژ به اندازه 8.75 افزایش و نقطه B ولتاژ آن به اندازه 0.25- از یک پریونیت افت می‌کند.

نمودار

فرض ب مشابه فرض الف است ولی خط CD بار ذخیره -IPu دارد. در این حالت ضرائب همان مقادیر قبل است ولی دامنه ولتاژ تابش اولیه متفاوت است. در خط CD به اندازه -IP^u بار ذخیره شده و نقطه B قبل از وصل یک است. بنابراین در حقیقت ولتاژ تابشی به دو به دو سر کلید اعمال می‌شود.

$$\text{ولتاژ اولیه که به خط CD اعمال می‌شود.} = \frac{309}{300+100} \times (1 - (-1)) = 1.5$$

$$\text{ولتاژ اولیه که به خط AB اعمال می‌شود.} = \frac{-100}{300+100} \times (1 - (-1)) = 0.5$$

نمودار

$V_A = IP^u$ باقی می‌ماند.

نمودار

فرض ج برقرار کردن توسط کلیدی با مقاومت Closing ($R_c = 400\Omega$) در این حالت ضرائب و دامنه ولتاژ اولیه متفاوت است.

$$\text{ولتاژ اولیه که به خط CD اعمال می شود.} = \frac{300}{300+100+400} \times IP^u = 0.375$$

$$\text{ولتاژ اولیه که به خط AB اعمال می شود.} = \frac{300}{300+100+400} \times IP^u = 0.125$$

$$\text{ولتاژی که روی مقاومت Closing} G_R = \frac{1 \times 400}{300+100+400} \times IP^u = 0.5 \text{ pu}$$

$$\text{ضرائب طرف AB} \begin{cases} \Gamma_R = \frac{700-100}{700+100} = 0.75 & \Gamma_S = -1 \\ \Gamma_t = \frac{2 \times 700}{700+100} = 1.75 \end{cases}$$

$$\text{ضرائب طرف CD} \begin{cases} \Gamma_R = \frac{500-300}{500+300} = 0.25 & \Gamma_S = -1 \\ \Gamma_t = \frac{2 \times 500}{500+300} = 1.25 \end{cases}$$

نمودار

تکلیف 11-2 - مجدداً مسئله قبل را به روش‌های Z ترانسفورم، تبدیل لاپلاس حل نمائید.

تکلیف 11-3 - در مسئله قبل اگر بار ذخیره روی خط CD, Ipu باشد و مقاومت Closing برابر 400Ω باشد، مسئله را در این حالت به ترتیب با روش لاپلاس و روش پیولی و روش Z ترانسفورم حل نمائید.

نمودار

پایان فصل Closing

فصل دوم

اضافه ولتاژهای ناشی از باز کردن کلیدهای دژنکتور در شبکه‌های قدرت (Opening)

مقدمه:

یکی از انواع حالت گذرا باز کردن کلیدها در شبکه است. ازدیاد ولتاژ ناشی از Opening در حدی نیست که روی طراحی عایقی اثر بگذارد ولی روی طراحی کلید دژنکتور و عملکرد آن اثر دارد. (در صورتی که در عمل Closing سطح عایقی سیستم از روی اضافه ولتاژها ناشی از آن در سطوح بالاتر از 230 کیلوولت به دست می‌آید.)

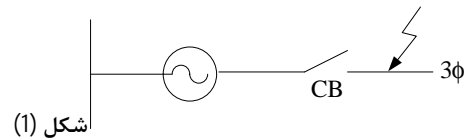
باز شدن کلید ممکن است در دو حالت زیر اتفاق بیفتد.

الف - باز شدن در اتصالی Fault Opening

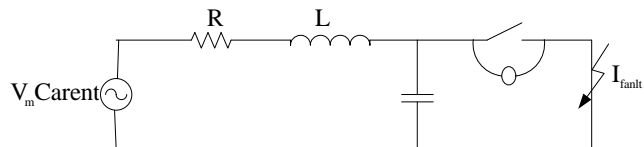
ب - باز شدن زیر بار Load Opening

خواهیم دید اضافه ولتاژ ناشی از قطع اتصالی در دو سه کنتاکت‌های دژنکتور برای هر نوع اتصالی متفاوت است.

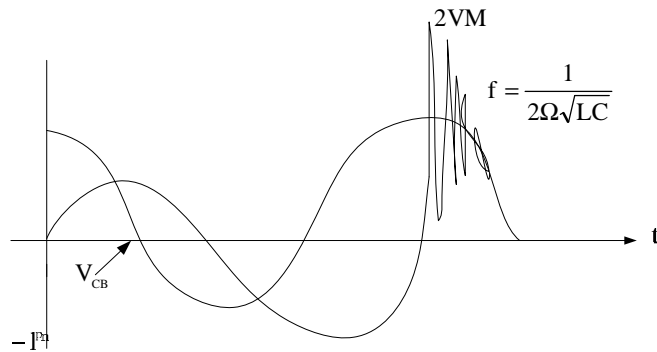
شکل زیر را در نظر بگیرید:



مدار معادل آن به علت وجود خاصیت خازنی و سلفی راهی مدار، مطابق شکل (2) است و ولتاژ در سر کنتاکت در لحظه قطع مطابق شکل (3) که به آن ولتاژ و بازگشت (Recovery Voltage) یا ولتاژ استقرار گویند.



$$\begin{cases} V_{CB} = V_m(1 - e^{-\alpha t} \cos \omega t) \\ \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \alpha = \frac{R}{2L} \end{cases}$$



شکل (3)

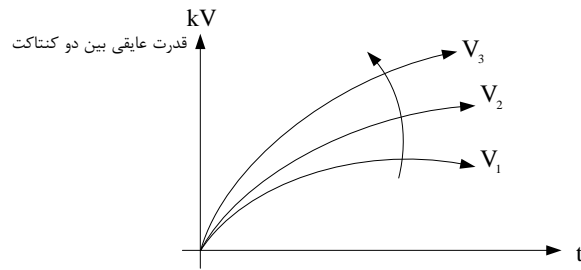
مشخصات این ولتاژ که در هنگام باز شدن دژنکتور در دو سر کنتاکت‌ها ظاهر می‌شود، عبارت است از:
 یک مؤلفه فرکانس بالا با فرکانس $f = \frac{1}{2R\sqrt{LC}}$ که بر ولتاژ سیستم سوار و پس از مدتی با ضریب میرایی
 $\alpha = \frac{R}{2L}$ ، میرا شده و به ولتاژ سیستم می‌رسد، می‌باشد و حداکثر دامنه آن $2V_m$ است.

نکته: در طراحی قدرت عایقی فضای بین دو کنتاکت که روغن یا گاز SF6 یا خلاء می‌باشد، بایستی قدرت
 عایقی بین دو کنتاکت Dielectric Strength به ولتاژ Stress ناشی از ولتاژ بازگشت Recovery Voltage
 غلبه کند تا عمل قطع صورت گیرد.

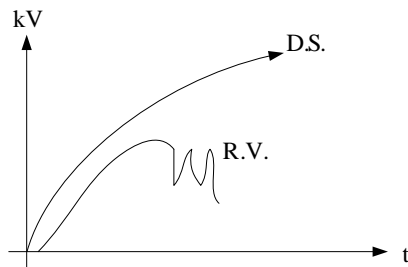
کلید دژنکتور زیر را در نظر بگیرید شامل:

شکل

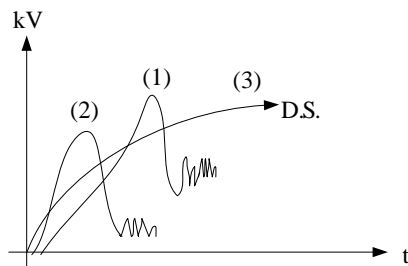
منحنی قدرت عایقی فضای بین دو کنتاكت با زمان تغییر می کند.



شرط قطع کلید این است که ولتاژ Stress زیر منحنی Dielectric Strength باشد.



نکته: در حالت های زیر وقتی منحنی RV منحنی DS را قطع می کند با اینکه کلید مکانیکی قطع شده ولی از لحاظ الکتریکی از طریق جریان قوس مدار وصل می باشد ولی به علت گرمای شدید کلید می ترکد.



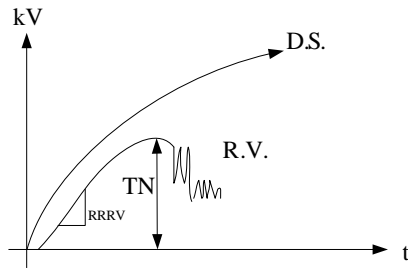
منحنی (1) و (2) ولتاژ بازگشت و منحنی (3) قدرت عایقی فضای بین دو کنتاكت است. دو عامل مشخصه ولتاژ بازگشت می باشد. (Recovery Voltage Characteristic)

1- دامنه ولتاژ بازگشت

1) Transient Recovery Voltage (TRV)

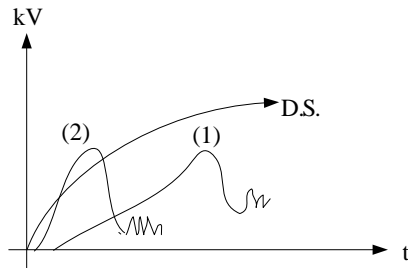
2- شیب افزایش ولتاژ بازگشت

2) Rate of Raise of Recovery Voltage (RARV)



سؤال: کدامیک از منحنی‌های ولتاژ بازگشت در شکل زیر خطرناکتر است:

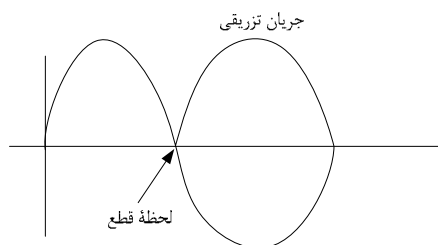
با این که دامنه منحنی (1) بیشتر است ولی منحنی (2) به دلیل قطع منحنی S (RRRV بالا) خطرناکتر است.



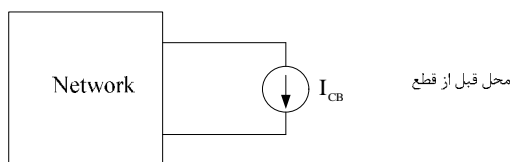
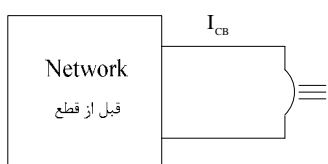
$$\begin{aligned} &TRV_1 > TRV_2 \\ &RRRV_1 < RRRV_2 \end{aligned}$$

منحنی (k) خطرناکتر است زیرا DS را قطع کرده است.

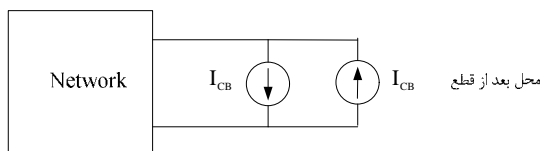
- روش‌های محاسباتی ولتاژ بازگشت دو سر کنتاکت‌های کلیدهای دژنکتور در هنگام باز شدن در یک شبکه
- الف - روش لاپلاس
- ب - هنگام قطع کلید در لحظه صفر جریان، جریانی معادل جریان قطع در جهت مخالف، به مدار تزریق می‌کنیم و با استفاده از جمع آثار، مسئله را دنبال می‌کنیم.



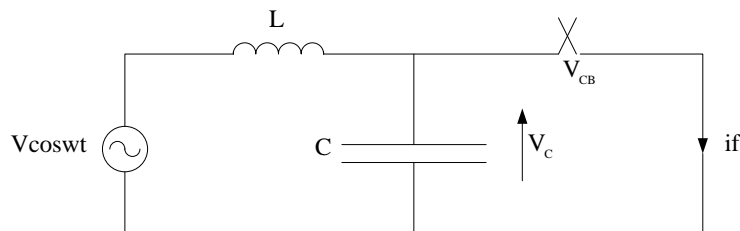
نکته: معمولاً جهت سادگی محاسبات، یک جریان خطی Ramp Function می‌توان در جهت مخالف تزریق کرد.



یک جریان مخالف در لحظه قطع معادل جریان قبل از قطع به سیستم اعمال می‌کنیم و با آثار قبل از قطع جمع می‌کنیم.



مسئله: مطلوب است محاسبه ولتاژ در سر کلید در مدار شکل زیر در هنگام قطع



ولتاژ در سر کلید همان ولتاژ در سر خازن است. $V_{CB} = V_C$

فرض تسهیلی: ولتاژ در سر قوس صفر است و در نقطه‌ای که جریان صفر است، قطع جریان دژنکتور صورت می‌گیرد.

حل:

$$\begin{cases} (1) \left[L \frac{di}{dt} + V_c = V_m \cos \omega t \right. \\ (2) \left[i = C \frac{dV_c}{dt} \right. \end{cases} \quad \Rightarrow \frac{d^2 V_c}{dt^2} + \frac{V_c}{LC} = \frac{V_m}{LC} \cos \omega t$$

$$S^2 V_c(S) - S V_c(0) + V_c'(0) + W_0^2 V_c(S) = \frac{W_0^2 V_m S}{S^2 + W_0^2} \quad W_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\begin{cases} V_c(0) = 0 & \text{ولتاژ در سر قوس صفر} \\ V_c'(0) = 0 & \text{ولتاژ قبل از باز شدن کلید 0 لحظه قطع جریان صفر است:} \end{cases}$$

$$V_{cb}(S) = V_c(S) = W_0^2 V_m \frac{S}{(S^2 + W_0^2)(S^2 + W_1^2)} + V_c(0) \frac{S}{S^2 + W_1^2} + \frac{V_c'(0)}{S^2 + W_1^2}$$

$$\frac{1}{W_0^2 - W_1^2} \left[\frac{S}{S^2 + W_0^2} - \frac{S}{S^2 + W_1^2} \right]$$

$$V_{cb}(t) = V_c(t) = V_m \frac{W_0^2}{W_0^2 - W_1^2} [\cos \omega t - \cos \omega_1 t]$$

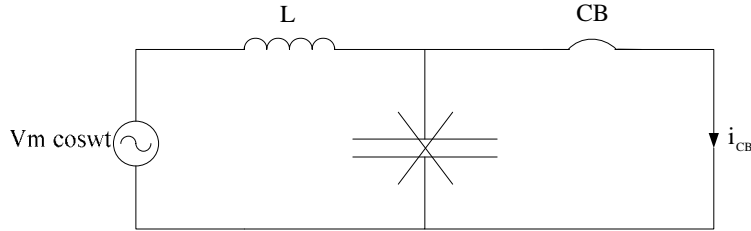
$$V_c(t) = V_m (\cos \omega t - \cos \omega_1 t) \quad \text{چون } W_0 \gg W_1$$

$$V_c(t=0^+) = V_m (1 - \cos \omega t) \quad \text{در لحظه } t=0 \text{ داریم: } \cos \omega t = 1$$

$$V_c(t=0^+) = V_m (1 - \cos \omega t) \quad \text{در لحظه } \frac{t}{\sqrt{LC}} = \pi \text{ داریم: } \cos \omega t = -1$$

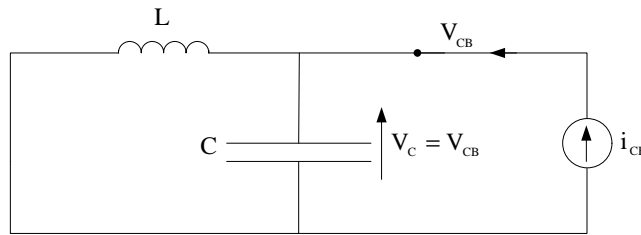
روش دوم: روش تزریق جریان

چنانچه در مسئله از اثر خازن در حین اتصالی صرفنظر کنیم، جریان دژنکتور قبل از قطع (i_{CB}) عبارت است از:



$$V_m \cos \omega t = L \frac{di_{CB}}{dt} \Rightarrow i_{CB} = \frac{V_m \sin \omega t}{L\omega}$$

حال یک جریان مساوی و مخالف i_{CB} به شبکه تزریق می‌کنیم (و بقیه منابع را صفر می‌گیریم).



$$V_{CB} = V_C = Z_{eq}(s) I_{CB}(s)$$

$$V_{CB}^{(t)} = \frac{LS \times \frac{1}{CS}}{LS + \frac{1}{CS}} \times \frac{V_m}{L\omega} \times \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \quad I_{CB}(s) = \frac{V_m}{L\omega} \times \frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$$

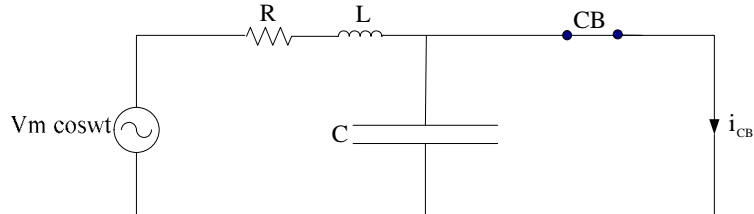
$$V_{CB} = V_{CB}(\overset{+}{I}) + V_{CB}(\overset{-}{0}) \quad V_{CB}(\overset{-}{0}) = 0 \quad V_{CB}(s) = \frac{s}{1 + LCS^2} \times \frac{1}{s^2 + \omega^2} V_m$$

$$V_{CB}(s) = \frac{V_m \omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2} \left[\frac{s}{s^2 + \omega^2} - \frac{s}{s^2 + \omega_1^2} \right]$$

$$V_{CB}(t) = V_m \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2} [\cos \omega t - \cos \omega_1 t]$$

نکته: اگر $\sin wt = wt$ را معادل Ramp بگیریم محاسبات ساده‌تر و تقریبی است. $i_{CB}(t) = \frac{Vm \sin wt}{LW} = \frac{Vm wt}{LW} = \frac{Vmt}{L} \Rightarrow I_{CB}(s) = \frac{Vm}{L} \times \frac{1}{s^2}$

مسئله 2: مطلوب است محاسبه ولتاژ کلید CB در مدار زیر در هنگام قطع جریان



$$i_{CB} = \frac{Vm \sin wt}{R + LW}; \frac{Vmw t}{R + LW}$$

اگر جریان سینوسی را خطی wt در نظر بگیریم:

$$I_{CB}(s) = \frac{WVm}{(R + sL)s^2}$$

$$V_{CB}(s) = I_{CB}(s) \times Z_{eq}(s) \quad V_{CB}(s) = \frac{WVm}{(R + sL)s^2} \times \frac{(R + sL) \times \frac{1}{Cs}}{R + sL + \frac{1}{Cs}}$$

$$\begin{cases} V_{CB}(t) = V_m (\cos wt - e^{-\alpha t} \cos wt) \\ \alpha = \frac{R}{2L} \end{cases}$$

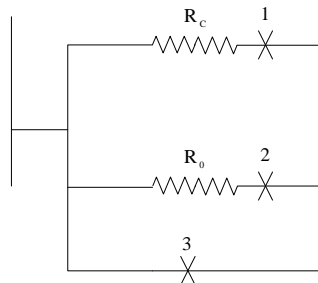
نکته: محاسبه مقاومت Opening در کلیدهای دژنکتور جهت کاهش ولتاژ بازگشت.

$$\frac{dV_{CB}}{dR} = 0 \Rightarrow R_{max} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$R_0 = R_{max} - R_{circuit}$$

R_0 : Opening

توجه: شکل روبرو، کلید مجهز به مقاومت Closing و مقاومت Opening جهت کاهش ولتاژ است.



1- در عمل Closing، اول کلید (1) بسته می‌شود و بعد از چند میلی ثانیه (بستگی به طول خط) کلید (2) بسته می‌شود.

2- در عمل Opening، اول کلید (2) باز می‌شود و بعد از چند میلی ثانیه کلید (3) باز می‌شود.

در شکل زیر یک کلید در محفظه‌ای همراه با مقاومت Opening و Closing را مشاهده می‌کنید.

شکل

نکته 2: مشخصات فنی یک کلید دژنکتور

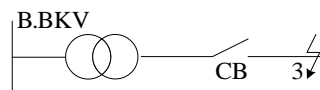
1- ولتاژ نامی

2- قدرت قطع $I_{sc} = \frac{V_n}{Z_{th}}, S_{sc} = \sqrt{3} U_n I_{sc}$

3- TRV

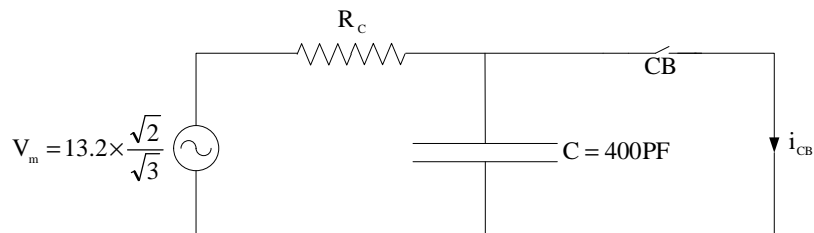
4- RRRV

مسئله: مطلوب است محاسبه مشخصات TRV و RRRV دژنکتوری که بتواند مدار اتصالی شبکه زیر را قطع کند:



راکتانس مدار $L=1$ mH و ظرفیت خازنی مدار $C=400$ pF

مدار معادل شبکه فوق به صورت زیر است :



$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2R\sqrt{1 \times 110 - 3 \times 400 \times 10^{-12}}} = 250 \text{ KHZ} \quad T = \frac{1}{f_0} = \frac{1}{250 \times 10^3} = 4 \mu\text{Sec}$$

$$(1) \text{TRV} = 2V_m = 2 \times 13.8 \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 22.6 \text{ kv}$$

$$(2) \text{RRRV} = \frac{\text{TRV}}{T/2} \quad \text{RRRV} = \frac{22.6}{2} = 11.3 \text{ kv}/\mu\text{Sec}$$

توجه کنید: این RRRV برای یک دژنکتور بسیار خوب SF6 می‌باشد.

نتیجه: محاسبه TRV و RRRV برای کلیدهای دژنکتور در مهندسی مشاور، از روابط زیر به دست می‌آید:

$$(1) f_0 = \frac{1}{2R\sqrt{LC}} \Rightarrow T = \frac{1}{f_0}$$

$$(2) TRV = 2V_m$$

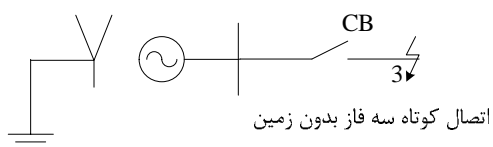
$$(3) RRRV = \frac{TRV}{T/2}$$

سؤال: هنگام سفارش یک کلید دژنکتور در یک پست، در یک نیروگاه بایستی دارای چه مشخصات فنی باشد و چگونه این مشخصات فنی را به دست می‌آوریم.

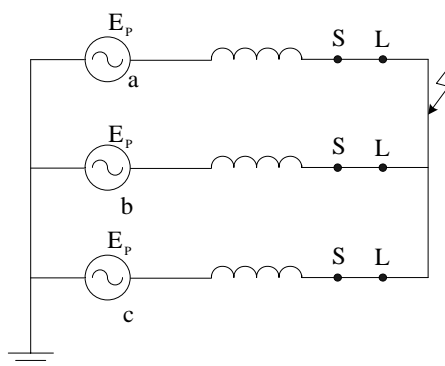
تاثیر نوع اتصال کوتاه و چگونگی زمین شدن سیستم و محل و نوع اتصال کوتاه در محاسبات ولتاژ بازگشت Recovery Voltage در هنگام باز شدن دژنکتور

الف - نوع اتصالی و چگونگی زمین شدن

شکل زیر را در نظر بگیرید:

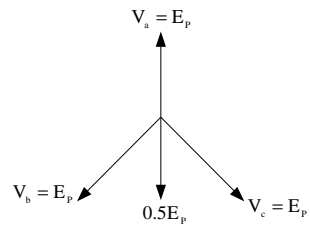


مدار سه فاز آن به صورت زیر است:



در شکل اتصال کوتاه سه فاز بدون زمین رخ داده و چون یکی از فازها کنتاکت‌هایش زودتر قطع می‌کند (از لحاظ مکانیکی هر سه فاز با هم باز می‌شوند ولی از لحاظ الکتریکی چون جریان‌ها با هم 120 درجه اختلاف فاز دارند یکی زودتر جریان آن به صفر می‌رسد و آن فاز زودتر از لحاظ الکتریکی قطع می‌شود).

ولتاژ نقطه S در حالت پایدار همان ولتاژ E_p فاز a است و ولتاژ نقطه L با توجه به شکل زیر برابر $Q5E_p$ است پس ولتاژ در سر کنتاکت‌های فاز a دژنکتور در حالت پایدار $1.5E_p$ می‌گردد.



نتیجه:

- 1- وقتی ولتاژ $V_{SL} = E_p$ بود ولتاژ $T.R.V = 2EP$ مقایسه شد. حالا که ولتاژ $V_{SL} = 1.5E_p$ است پس $TRV = 3E_p$ است.
- 2- وقتی فاز b قطع می‌شود، ولتاژ دو سر کنتاکت‌های مربوطه $V_{SL} = \sqrt{3}E_p$ خواهد شد. بنابراین ولتاژ $TRV = 2\sqrt{3}E_p$ خواهد بود.
- 3- وقتی ولتاژ فاز C قطع می‌شود TRV نخواهیم داشت.
- 4- اگر اتصال کوتاه سه فاز با زمین رخ دهد، ولتاژ دو سر همه کنتاکت‌ها در حالت پایدار E_p است پس $TRV = 2E_p$ خواهد بود.

تکلیف 13-1: بررسی انواع اتصال کوتاه‌ها و اثر آن در ولتاژ بازشت در هنگام قطع کلید.

الف - اتصال کوتاه تک فاز

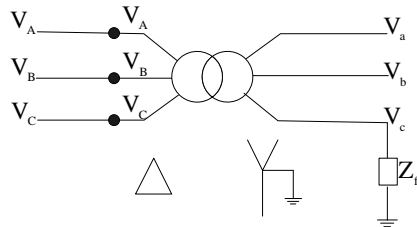
ب - اتصال کوتاه در فاز با هم

ج - اتصال کوتاه در فاز با هم و زمین

د - قطع یک فاز

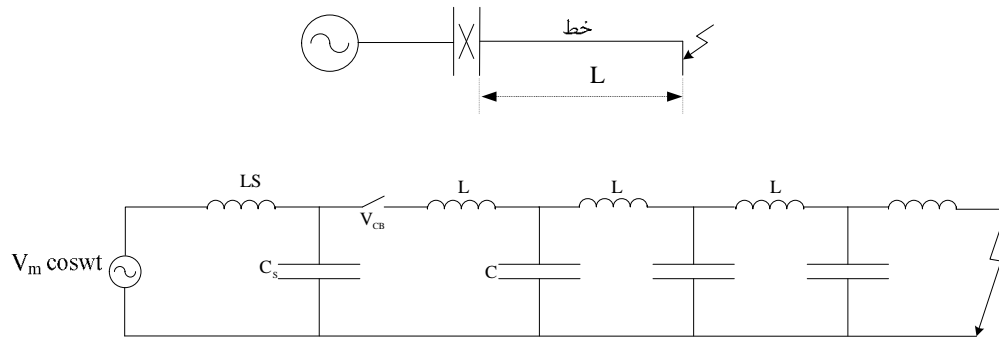
ه - قطع دو فاز

تکلیف 13-2: محاسبه نامتعادلی هر یک فیدر سه فاز وقتی بار تک فاز داشته باشد.



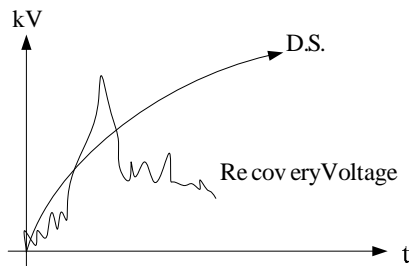
توجه کنید: در بحث‌های قبل اتصال کوتاه‌های معرفی شده درست روی ترمینال‌های کلید جهت محاسبه ولتاژ بازگشت اتقال افتاده بود. حال اگر اتصال کوتاه در محلی به فاصله L از دژنکتور رخ دهد خواهیم دید مسئله ترکیبی از حل مدارات فشرده و گسترده می‌باشد و شکل ولتاژ بازگشت به صورت دیگری خواهد بود.

شکل زیر را در نظر بگیرید:

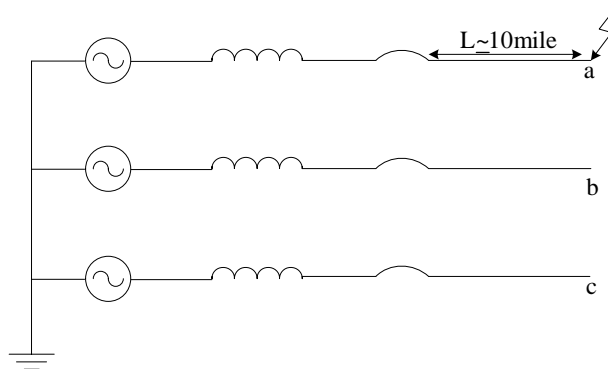


خواهیم دید بدترین اتصال کوتاه برای ولتاژ بازگشت کلید هنگام باز شدن Short Line fault است که معمولاً "حدود 10 مایل می باشد."

شکل ولتاژ بازگشت در Short Line fault مطابق زیر به صورت دندانه اره ای است:



نکته مهم: بدترین حالت برای عملکرد دژنکتور وقتی است که اتصال کوتاه تک فاز در مسئله Short Line Fault رخ دهد و فازی که خط روی آن خطا رخ داده آخرین فازی باشد که قطع می شود.

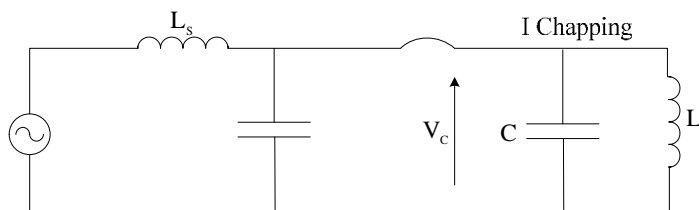
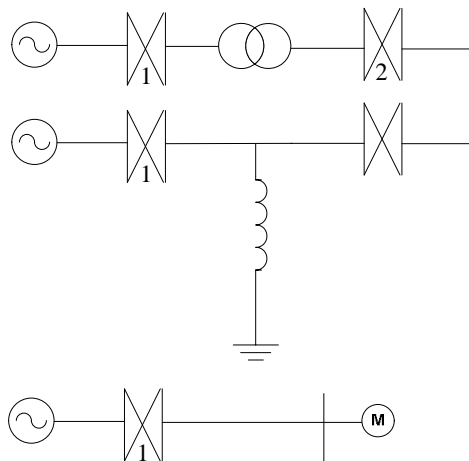


قطع جریان مغناطیسی (قطع کلید در جریان غیر صفر کم) Current Chopping

مقدمه: در دژنکتورهای هدایت قوس از نوع Air Blast که فشار هوا سرعت برای تمام جریان های قطع یکسان است، وقتی جریان کم باشد (مثل جریان مغناطیسی در ترانسفورماتورها و موتورهای الکتریکی و

راکتورها در بی‌باری) دژنکتور می‌تواند قبل از اینکه جریان به صفر رسد، کلید را قطع نماید و به این مقدار جریان I chopping گویند.

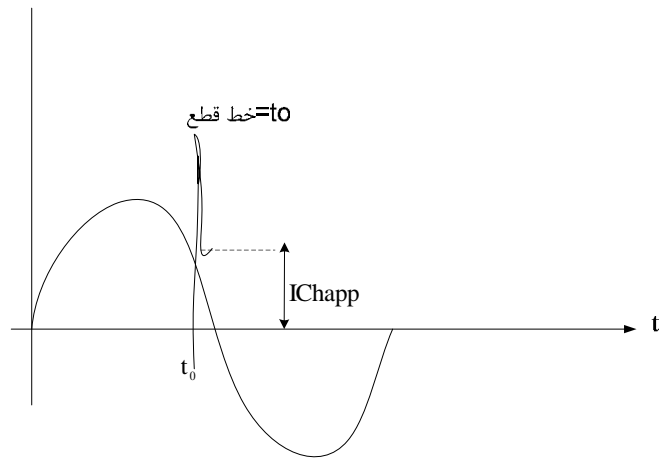
مدارات تک خطی زیر دارای مدار معادل ارائه شده می‌باشد:



موقعی که دژنکتور در جریان غیر صفر IChopp قطع می‌کند، انرژی موجود در سلف به صورت زمانی در خازن تخلیه شده (به عبارت دیگر انرژی الکترو مغناطیسی ذخیره شده در L به ازای جریان IChopp به انرژی الکترو استاتیک تبدیل می‌شود).

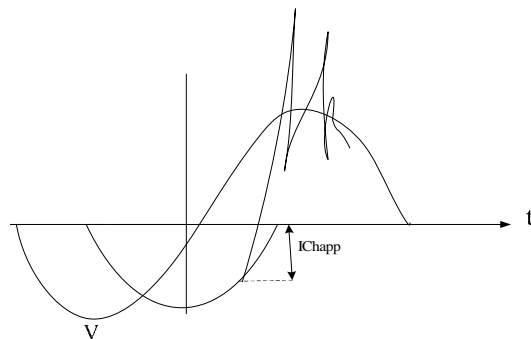
موقعی که دژنکتور در جریان غیر صفر I Chapp قطع می‌کند، انرژی موجود در سلف به صورت زمانی در خازن تخلیه شده (به عبارت دیگر انرژی الکترومغناطیسی ذخیره شده در L به ازای جریان IChapp به انرژی الکترواستاتیک تبدیل می‌شود). یعنی:

$$\frac{1}{2} L I_{Chapp}^2 = \frac{1}{2} V_c^2 C \Rightarrow V_c^2 = \frac{L}{C} I_{Chapp}^2 \Rightarrow V_c = I_{Chapp} \sqrt{\frac{L}{C}}$$



احتمال اضافه ولتاژ تا 30 برابر ولتاژ نامی در قطع ترانسفورماتور یا موتور یا راکتور بی‌بار وجود دارد موجب از بین رفتن عایق و سوختن آنها می‌شود.

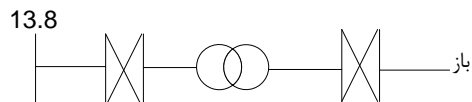
نکته: ثابت می‌شود شکل تغییرات ولتاژ مطابق شکل زیر است (نوسان به خاطر مقاومت می‌باشد).



مثال: در شکل زیر مشخصات ترانسفورماتور عبارت است از:

$$I_m = 1.5A \quad f = 60\text{HZ} \quad S_n = 100\text{kVA} \quad V_n = 13.6\text{kV}$$

$$C = 1000 \sim 7000\text{PF} \Rightarrow C = 5000\text{PF}$$



چنانچه دژنکتور ترانسورماتور را در حالت بی‌باری با جریان مغناطیسی در پیک قطع کند، مطلوب است محاسبه ولتاژ بازگشت کلید ناشی از قطع بی‌برقی ترانسفورماتور.

$$L_m = \frac{V}{\omega I_m} = \frac{13.8}{\sqrt{3} \times 377 \times 1.5} = 14\text{H}$$

$$I_{\text{peak}} = \sqrt{2} \times 1.5 = 2.1$$

$$V_{\text{CA}} = V_c = I_{\text{peak}} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$I_{\text{peak}} = 2.5\text{A}$$

$$V_{\text{CB}} = 2.5 \sqrt{\frac{14}{5000 \times 10^{-12}}} = 133\text{kV}$$

حدود 10 برابر ولتاژ نامی است.

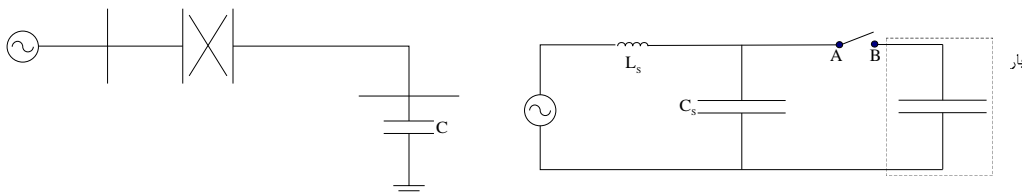
نکته: چه عواملی این ولتاژ را کم می‌کند:

- 1- خازن کابل‌های رابط
- 2- اثر پس‌ماند
- 3- مقاومت سیستم
- 4- ولتاژ ARC کلید

تکلیف 3-13: مقاله‌ای جهت کنفرانس توزیع تا 25 بهمن بنویسید تحت عنوان علت سوخت ترانسفورماتورها و موتورهای الکتریکی در شبکه‌های توزیع و نیروگاه‌ها

قطع جریان خازنی Capacitive Current Interruption

این بحث شامل قطع بانک‌های خازنی، کابل‌ها و خطوط انتقالی بی‌بار و غیره را دربر می‌گیرد. شکل زیر را در نظر بگیرید. هنگامی که یک بانک خازنی را قطع می‌نمائیم در جریان صفر، ولتاژی که روی خازن می‌ماند برابر $V_m - V_B$ می‌باشد.



بعد از نیم سیکل ولتاژ نقطه A برابر V_m و ولتاژ در سر کلید برابر $2V_m$ خواهد بود.

شکل

مطابق شکل زیر مشخصه TRV و RRRV ولتاژ دو سر کنتاکت‌ها در حالت گذرا (ولتاژ بازگشت معمولاً) از حد تحمل بارهای دیگر بیشتر است و کلید اگر نتواند در این سیکل قطع کند ممکن است در سیکل‌های بعد مقدار آن به $5V_m$ و بعد $7V_m$ برسد و موجب انفجار کلید گردد.

شکل

با توجه به مدل مداری شکل فوق اگر فاصله هوایی ناشی از باز کردن کلید بانک خازنی $2V_m$ شود ولتاژ بازگشت در سر کلید در حالت گذرا عبارت است از:

$$L \frac{di}{dt} + \frac{L}{C} \int i dt = V_m - V_c(0)$$

$$LSI(S) + LI(0) + \frac{I(S)}{SC} = \frac{V_m - V_c(0)}{S} \quad -I(0) = 0$$

$$(S^2 + W_0^2)I(S) = \frac{V_m - V_c(0)}{L} \quad I(S) = \frac{V_m - V_c(0)}{L(S^2 + W_0^2)}$$

مراجع:

- [1] Allan Greenwood, "Electrical Transients in Power Systems," John Wiley & Sons, 1991.
- [2] Glover, Sarma, "Power System Analysis and Design," PWS Publishing Company, Ch. 12, 1994.
- [3] Alvan V. Oppenheim, Alan S. Willsky, "Signals and Systems," Prentice-Hall, 2005.