$$KCL(b): \quad 0 = \frac{v_b - v_a}{20} + \frac{v_b - v_e}{20} + \frac{v_b - v_c}{5}$$

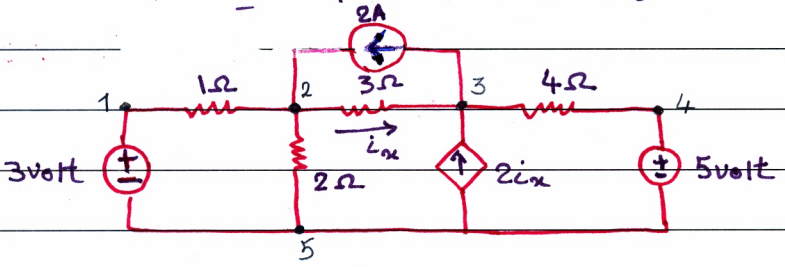
$$KCL(c): \quad 0 = \frac{v_c - v_b}{5} + \frac{v_c - v_e}{10} + \frac{v_c - v_d}{2} - 8i_x$$

$$i_x = \frac{v_b - v_c}{5}$$

$$\Rightarrow \quad v_b = 16 \qquad v_c = 10$$

نکته: چنانچه در داری منابع وابسته حضور داشته باشند، تعداد معادلات از مجهولات بیشتری شود دو با یک معادله دیگر به عنوان اضافه کنیم که در آن وابستگی منبع را برحسب ولتاژهای گره‌های مجهول به دست آوریم.

مدار سوال زیر را با استفاده از روش گره حل کرده و ولتاژ تمام گره‌ها را به دست آورید. : Example



گره شماره 5 = گره مرجع $\longrightarrow V_5 = 0$

$v_1 - v_5 = 3 \longrightarrow v_1 = 3volt$

$v_4 - v_5 = 3 \longrightarrow v_4 = 5volt$

$$KCL(2): \quad \frac{v_2 - v_1}{1} + \frac{v_2 - v_5}{2} + \frac{v_2 - v_3}{3} = 2$$

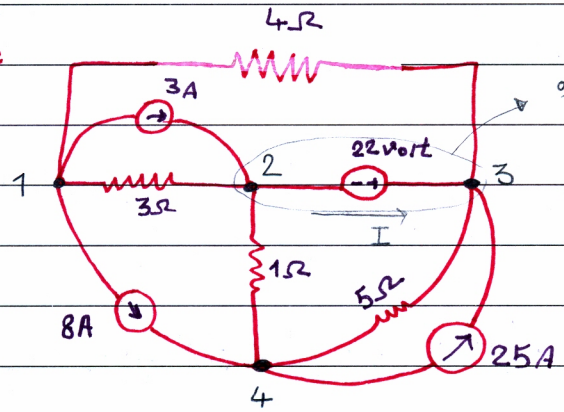
$$KCL(3): \quad 2 + \frac{v_3 - v_2}{3} + \frac{v_3 - v_4}{4} = 2i_x$$

$$i_x = \frac{v_2 - v_3}{3}$$

$$\begin{cases} 11v_2 - 2v_3 = 30 \\ 4v_2 - 5v_3 = 3 \end{cases} \Rightarrow \quad v_2 = 3,063 \text{ volt} \quad v_3 = 7,846 \text{ volt}$$

تعداد منابع وابسته + تعداد منابع وابسته در مدار = تعداد گره − 1 − تعداد معادلات / مجهولات

Example:



روش تحلیل ابرگره :

ابرگره

$v_4 = 0$

$$KCL(1): \quad 3 + 8 + \frac{v_1 - v_2}{3} + \frac{v_1 - v_3}{4} = 0 \quad *$$

$$KCL(2): \quad \frac{v_2 - v_1}{3} + \frac{v_2}{1} + I = 3$$

$$KCL(3): \quad \frac{v_3 - v_1}{4} + \frac{v_3 - 0}{5} - I = 25$$

(+)

به جای نوشتن این دو معادله می‌توان از شاخه ابرگره صرف‌نظر کرد و KCL (2+3) را به صورت یکپاره برنشت آورد.

$$KCL(2+3) = \frac{v_2 - v_1}{3} + \frac{v_2}{1} + \frac{v_3 - v_1}{4} + \frac{v_3}{5} = 28 \quad *$$

$$v_3 - v_2 = 22 \quad *$$

* سه معادله و سه مجهول داریم.

$v_1 =$

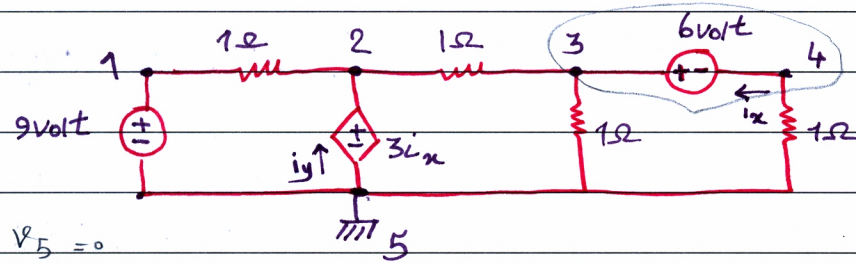
$v_2 =$

$v_3 =$

مراحل تحلیل ابرگره :

1. تعداد گره ها را تعیین می‌کنیم
2. یک گره به عنوان مرجع انتخاب می‌کنیم
3. ابرگره را تعیین می‌کنیم (ابرگره = گره‌های دو سر یک منبع ولتاژ است به شرطی که هیچ کدام هم زمین نباشد)
4. برای گره‌های غیر از ابرگره و مرجع KCL را اعمال می‌کنیم
5. برای ابرگره یک KCL به صورت همزمان اعمال می‌کنیم
6. رابطه ابرگره را به معادله اضافی بدست می‌آوریم
7. دستگاه معادلات را حل کرده و ولتاژ گره‌ها را بدست می‌آوریم .

مثال دوار به روش ابرگره : Example !



$v_5 = 0$

$v_1 - v_5 = 9 \Rightarrow v_1 = 9$

$v_2 - v_5 = 3i_x \Rightarrow v_2 = 3i_x$

$KCL(3,4)\ \frac{v_3 - v_2}{1} + \frac{v_3}{1} + \frac{v_4 - 0}{1} = 0 \Rightarrow \frac{v_3 - 3i_x}{1} + \frac{v_3}{1} + \frac{v_4}{1} = 0$

$v_3 - v_4 = 6$

$i_x = \frac{0 - v_4}{1}$

$$\begin{cases} v_3 - 3(-v_4) + v_3 + v_4 = 0 \\ v_3 - v_4 = 6 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} v_3 = 4 \\ v_4 = -2 \end{cases}$$

i_y محاسبه:

$$KCL(2): \frac{v_2 - v_1}{1} + \frac{v_2 - v_3}{1} = i_y$$

$$\frac{6-9}{1} + \frac{6-4}{1} = i_y \Rightarrow i_y = -1$$

روش تحلیل خانه‌ای یا MESH ← تعیین بر اساس KVL

← هدف اصلی: جریان هر خانه

← هدف دومی: محاسبه ولتاژ عناصر

* روش تحلیل مش فقط در مورد مدارهای صفحه‌ای قابل استفاده است.

* مدار صفحه‌ای مداری است که در آن هیچ دو عنصری از رو یا زیر هم عبور نکرده باشند.

* خانه یا MESH حلقه‌ای است که حلقه دیگری داخل آن نباشد.

مراحل کار:

1/ تعیین تعداد خانه‌ها

2/ در نظر گرفتن یک جریان با جهت قراردادی ساعتگرد برای هر خانه

3/ اعمال قانون KVL برای هر خانه

نکات KVL:

a: هرگاه در مورد منابع ولتاژ وارد پارامتر ← منبع سیستم با علامت ← و هرگاه وارد پارامتر ← منبع سیستم با علامت + آنرا وارد می‌کنیم.

b: در مورد مقاومت‌ها فرض می‌کنیم جریان آن خانه از طرفی با پتانسیل مثبت وارد آن شود. بنابراین علامت ولتاژ دو سر مقاومت به صورت زیر وارد می‌شود:

حالت 1: اگر مقاومتی فقط متعلق به حلقه 1 بود: $+R i_1$

حالت 2: " " " " " حلقه 2 بود: $+R i_2$

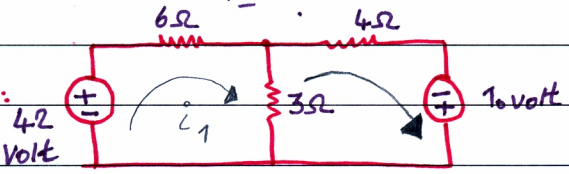
حالت 3: اگر مقاومتی بین حلقه 1 و 2 مشترک بود فرض می‌کنیم در خانه‌ای که هستیم جریان آن خانه از سایر خانه‌ها بزرگتر باشد پس اگر در حال نوشتن KVL در خانه 1 هستیم: $R(i_1 - i_2)$

و اگر در حال نوشتن KVL در خانه 2 هستیم: $R(i_2 - i_1)$

4) مجهولات را در اثر حضور منابع و با سمت ظاهری شون را بر حسب جریان خانه ها می نویسیم .

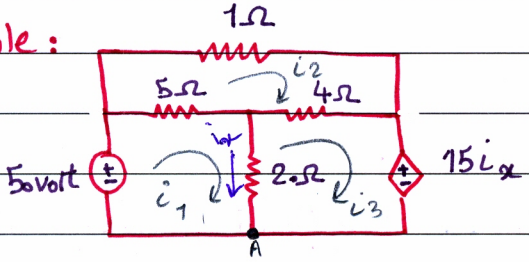
5) دستگاه معادلات را حل کرده و جریان تمام خانه ها را می سر می کنیم .

Example:



$$\text{KVL(1)}: -42 + 6i_1 + 3(i_1 - i_2) = 0 \qquad i_1 = 6A$$
$$\text{KVL(2)}: -10 + 3(i_2 - i_1) + 4i_2 = 0 \Rightarrow \qquad i_2 = 4A$$

Example:



$$\text{KVL(1)}: -50 + 5(i_1 - i_2) + 20(i_1 - i_3) = 0$$

$$\text{KVL(2)}: 1\times i_2 + 4(i_2 - i_3) + 5(i_2 - i_1) = 0$$

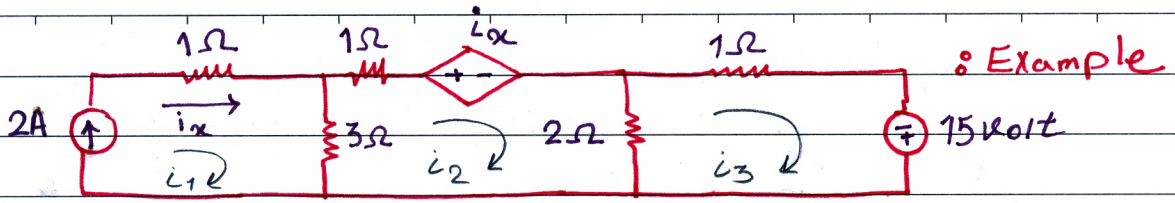
$$\text{KVL(3)}: 15i_x + 20(i_3 - i_1) + 4(i_3 - i_2) = 0$$

$$\text{KCL(A)}: i_x + i_3 = i_1 \Rightarrow i_x = i_1 - i_3$$

جایگذاری در KVL(3)

⇐ 3 معادله 3 مجهول داریم ⇐

$$i_1 = 29{,}6A \qquad i_2 = 26A \qquad i_3 = 28A$$



$$i_1 = i_x = 2A$$

$$KVL(2): \quad 3(i_2 - i_1) + 1\,i_2 + i_x + 2(i_2 - i_3) = 0$$

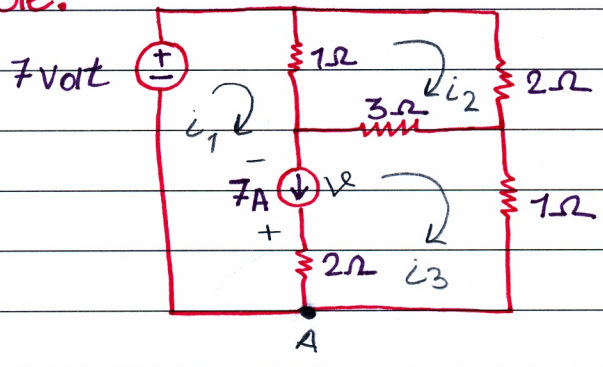
$$KVL(3): \quad 2(i_3 - i_2) + 1\,i_3 = 15$$

حل دستگاه :
$$\begin{cases} 3i_2 - i_3 = 2 \\ -2i_2 + 3i_3 = 15 \end{cases} \Rightarrow \begin{matrix} i_2 = 3A \\ i_3 = 7A \end{matrix}$$

تعداد منابع وابسته + تعداد منابع جریان ثابت − تعداد گره‌ها = تعداد معادلات / مجهولات

Example:

روش کامل ابرگره :



$$\begin{cases} KVL(1): \quad -7 + 1(i_1 - i_2) - V + 2(i_1 - i_3) = 0 \\ KVL(3): \quad +3(i_3 - i_2) + 1\,i_3 + 2(i_3 - i_1) + V = 0 \end{cases}$$

برای نوشتن این دو معادله می‌توان از شاخه ابرگره صرف‌نظر کرد و KVL(1+3) را به صورت یکباره نوشت

$$KVL(2): \quad 1(i_2 - i_1) + 2i_2 + 3(i_2 - i_3) = 0$$ ✗ آورد

راه‌حل ابرحلقه

$KVL(1+3) = -7+1(i_1-i_2)+3(i_3-i_2)+i_3=0$ ✱

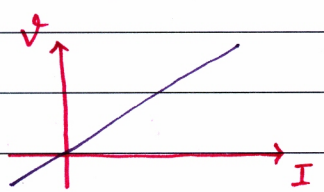
$KCL(A): 7+i_3 \Rightarrow i_1-i_3=7$ ✱

✱ سه معادله و سه مجهول داریم پس حل می‌شود.

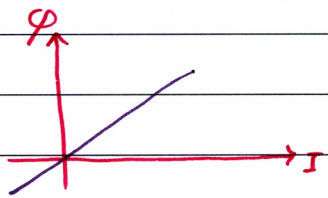
ابرحلقه دو حلقه‌ای می‌باشد که ما بین آن‌ها یک منبع جریان حضور داشته باشد. در این حالت پس از تعیین یک جریان برای یک شاخه‌ها یکی شاخه شامل منبع جریان را حذف کرده و برای آن دو حلقه به صورت همزمان یک KVL اعمال می‌کنیم و در نهایت رابطه ابر حلقه را به عنوان یک معادله اضافی ۶ اضافه می‌کنیم.

قضایای حاکم بر سلف‌های خطی:

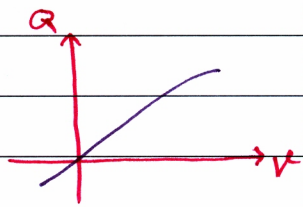
عنصر خطی عنصری است که منحنی توصیف کننده رابطه بین پارامترهای اساسی آن خط راستی باشد که از مبداء عبور کند.



$v = RI$

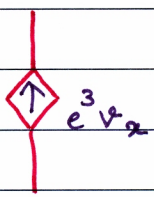


$\varphi = LI$

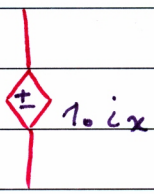


$Q = C.v$

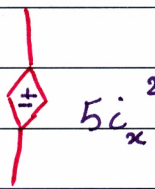
منابع ولتاژ یا جریان خطی وابسته:



منبع جریان وابسته به ولتاژ خطی

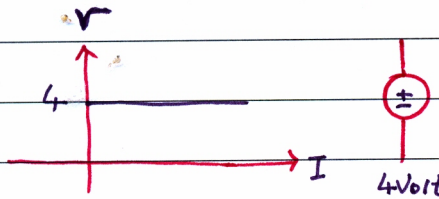


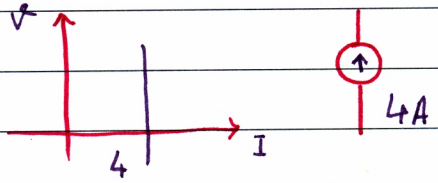
منبع ولتاژ وابسته به جریان خطی



منبع ولتاژ وابسته به جریان غیرخطی

منبع ولتاژ و جریان مستقل

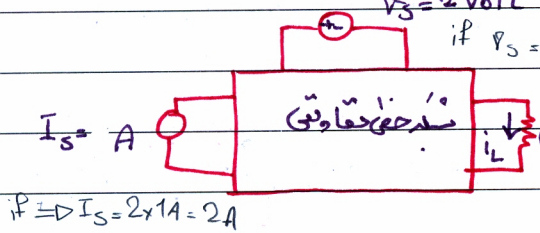




این عناصر هم عنصر خطی هستند اما وجود آنها در یک شبکه آن شبکه را عنصر خطی نمی کند.

شبکه خطی: شبکه ای است که فقط شامل عنصر خطی، منابع جریان یا ولتاژ خطی باشد و منابع جریان یا ولتاژ مستقل باشد

۱/ پاسخ یک شبکه خطی (ولتاژ یا جریان دوسر یک عنصر) متناسب است با منابع مستقل موجود در آن شبکه.



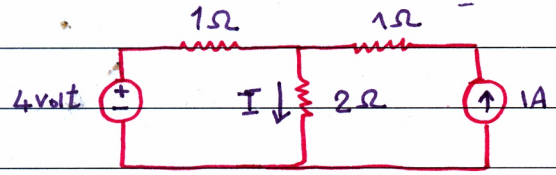
۲/ قضیه جمع آثار:

پاسخ یک شبکه (ولتاژ یا جریان دوسر یک عنصر مورد نظر) = جمع جبری پاسخ های شبکه به ازای تک تک منابع مستقل به شرط

که در بررسی اثر هر منبع مستقل، سایر منابع مستقل را صفر در نظر بگیریم.

(منابع ولتاژ مستقل صفر = اتصال کوتاه
منابع جریان مستقل صفر = مدار باز)

Example: با استفاده از تقسیم جمع آثار جریان I را بدست آورید.

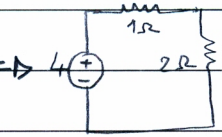


$$I = I_1 + I_2$$

I_2: فقط به ازای منبع جریان

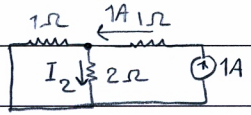
I_1: فقط به ازای منبع ولتاژ

I_1 ⇒ برای محاسبه جریان به ازای منبع ولتاژ باید منبع جریان مستقل را صفر (مدار باز) کنیم



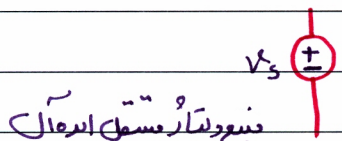
$$\Rightarrow I_1 = \frac{4}{1+2} = \frac{4}{3}\,A$$

I_2 ⇒ برای محاسبه جریان به ازای منبع جریان باید منبع ولتاژ مستقل را صفر (اتصال کوتاه) کنیم



$$\Rightarrow I_2 = \frac{1}{1+2} \times 1 = \frac{1}{3}\,A$$

تبدیل منابع:



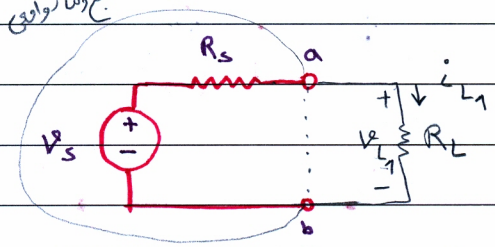
منبع ولتاژ مستقل ایده‌آل

منبع جریان مستقل ایده‌آل

منابع ولتاژ یا جریان ایده‌آل قابل تبدیل به یکدیگر نیستند.

روش تبدیل منابع ولتاژ و جریان غیرایده‌آل (واقعی):

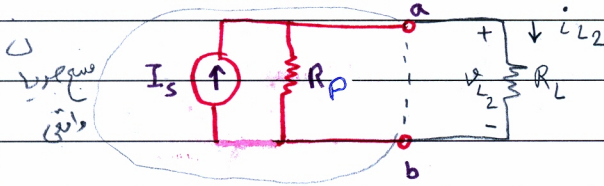
منبع ولتاژ واقعی



$$\begin{cases} i_{L_1} = \dfrac{V_s}{R_L + R_s} \\ V_{L_1} = \dfrac{R_L}{R_L + R_s} \times V_s \end{cases}$$

مقادیر تقسیم ولتاژ

منبع جریان واقعی



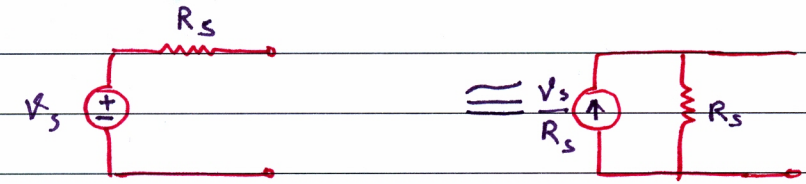
$$\begin{cases} i_{L_2} = \dfrac{R_p}{R_L + R_p} \times I_s \\ V_{L_2} = \dfrac{R_L \cdot R_p}{R_L + R_p} \times I_s \end{cases}$$

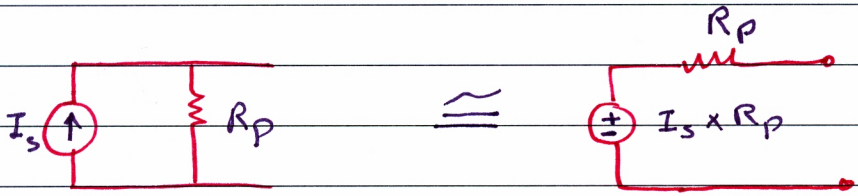
مقادیر تقسیم جریان

شرط تساوی منابع ولتاژ واقعی با منبع جریان واقعی:

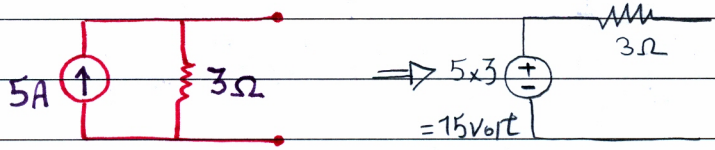
$S = R_p$, $V_s = R_p \cdot I_s$ } از مساوی قرار دادن $i_{L_1}, i_{L_2}, v_{L_1}, v_{L_2}$ به این نتیجه می‌رسیم که باید { $I_{L_1} = I_{L_2}$, $V_{L_1} = V_{L_2}$

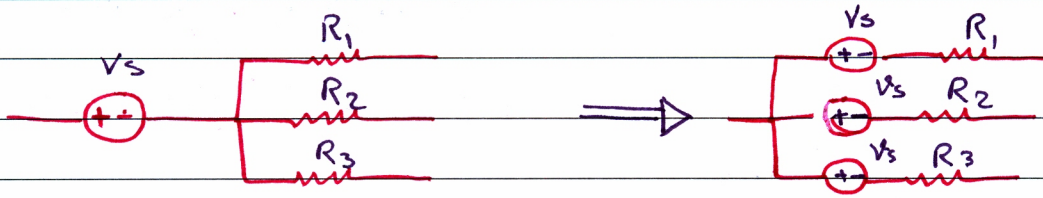
$\rightarrow I_s = \frac{V_s}{R_s}$

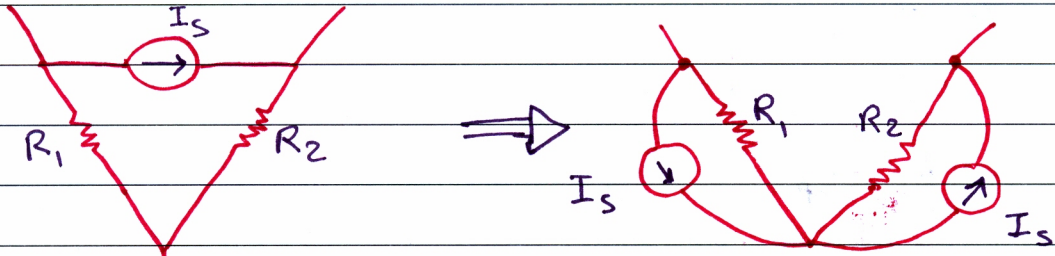


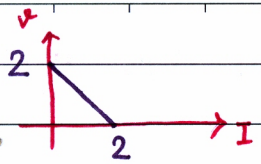


Example:



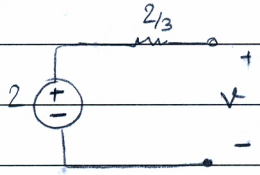






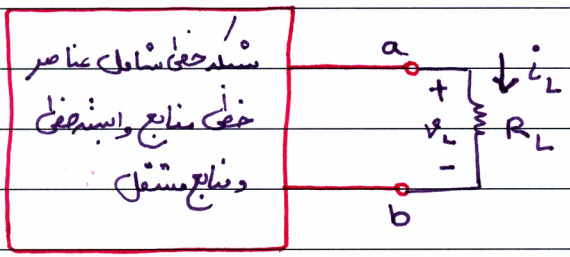
معادله خط : $v = -\frac{2}{3} i + 2$

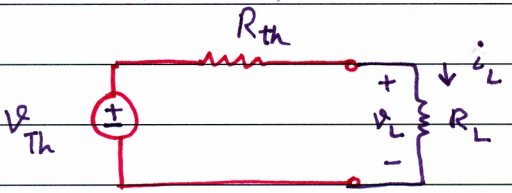
$-2 + \frac{2}{3} i + v = 0$



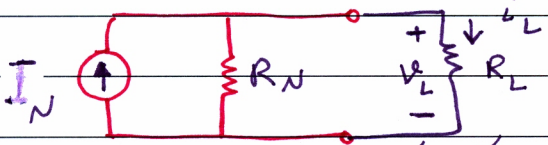
قضایای حاکم بر مدارهای خطی :

معادل های تونن و نورتن یک شبکه خطی :





معادل تونن



معادل نورتن

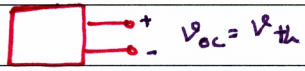
از روی شرط تساوی منابع جریان و ولتاژ واقعی می توانیم نتیجه بگیریم که :

$$\begin{cases} R_{th} = R_N \\ I_N = \frac{V_{th}}{R_{th}} \\ V_{th} = R_N \cdot I_N \end{cases}$$

نحوه محاسبه مقادیر V_{th} و R_{th} و I_N از روی مدار خطی در حالت کلی :

1/ محاسبه V_{th} : دوسر ab را مدار باز می‌کنیم (مثل این می‌ماند مقاومت بار به اندازه $R_L = \infty$ متصل کنیم) و تفاوت دوسر مدار باز را حساب می‌کنیم و آنرا V_{oc} می‌نامیم آن گاه داریم :

$$V_{th} = V_{oc}$$



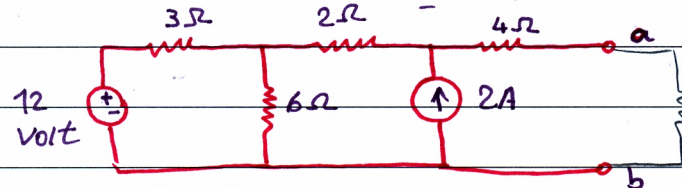
2/ محاسبه I_N : دوسر ab را اتصال کوتاه می‌کنیم ($R_L = 0$ در نظر گرفته می‌شود) جریان عبوری از این اتصال کوتاه را حساب کرده و i_{sc} می‌نامیم آن گاه خواهیم داشت :

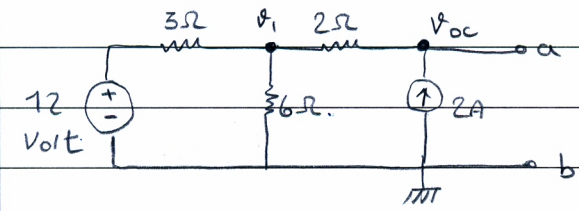
$$I_N = i_{sc}$$

3/ محاسبه R_{th} :

$$R_{th} = \frac{V_{oc}}{i_{sc}}$$

Example: معادل تونن مدار شکل زیر را از دوسر ab بدست آورید.

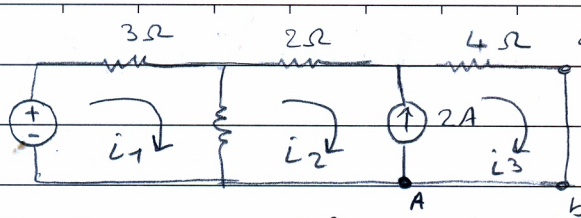




$$KCL(1) = \frac{V_1 - 12}{3} + \frac{V_1}{6} + \frac{V_1 - V_{oc}}{2} =$$

$$KCL(V_{oc}) = \frac{V_{oc} - V_1}{2} = 2$$

$$\Rightarrow V_1 = 12 \qquad V_{oc} = 16 \qquad \Rightarrow V_{th} = 16$$



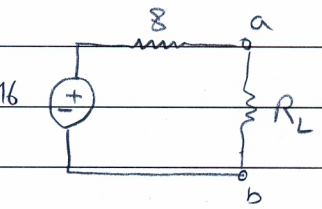
$$KVL(1): \quad -12 + 3i_1 + 6(i_1 - i_2) = 0$$

$$KVL(2,3): \quad 6(i_2 - i_1) + 2i_2 + 4i_3 = 0$$

رابطه اضافه: $KCL(A) \Rightarrow i_3 = i_2 + 2$

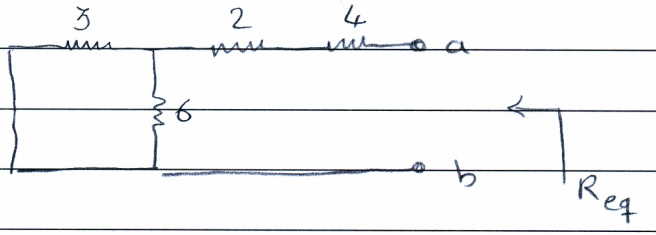
ازحل معادلات داریم: $i_3 = 2 \Rightarrow i_{sc} = 2A \Rightarrow I_N = 2A$

$$R_{th} = \frac{V_{oc}}{i_{sc}} = \frac{16}{2} = 8$$



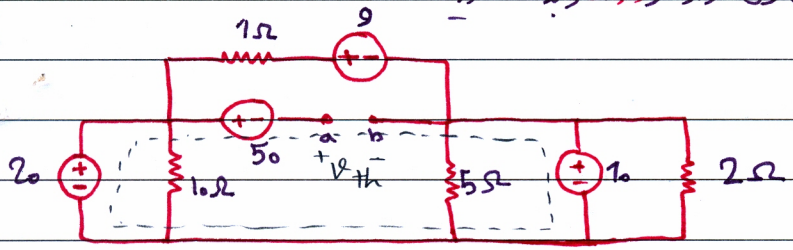
نکته: چنانچه مدار خطی و فقط شامل منابع مستقل باشد می توانیم برای محاسبه R_{th} تمام منابع مستقل را صفر کنیم (یعنی منابع ولتاژ مستقل را اتصال کوتاه و منابع جریان مستقل را اتصال باز کنیم) آن گاه مقاومت معادل از دو سر ab مساوی با R_{th} خواهد بود.

در مثال قبل داریم:



$$R_{eq} = R_{th} = (3 \| 6) + 2 + 4 = 8\,\Omega$$

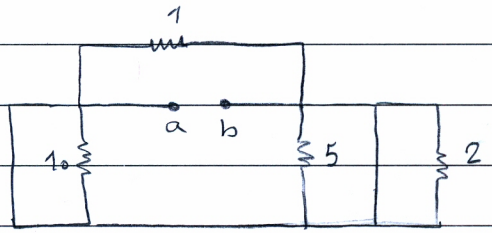
Example: در مدار شکل فوق معادل تونن از دو سر a و b را بدست آورید.



$V_{oc} = V_{th}$

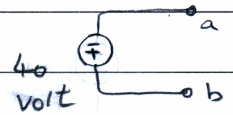
KVL (حلقه): $-2o + 5o + V_{th} + 1o = 0 \Rightarrow V_{th} = -4o$

برای بدست آوردن R_{th} چون منابع همگی مستقل هستند آنها را صفر می‌کنیم و داریم:



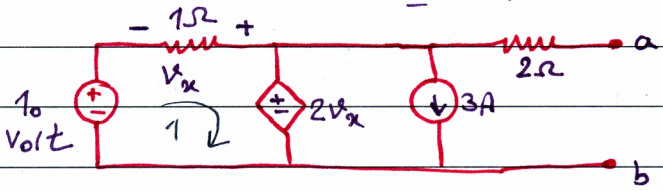
$R_{eq} = R_{th} = o$

معادل تونن:



محاسبه معادل تونن در حضور منابع وابسته:

Example: در مدار شکل فوق معادل تونن را از دو سر a و b بدست آورید.



① $V_{oc} = V_{th}$

$V_{th} = 2V_x$

KVL(1): $-1o + 1 \times i_1 + 2V_x = o$

$1 \times i_1 = -V_x$

$\Rightarrow -1o - V_x + 2V_x = o \Rightarrow V_x = 1o$

$\Rightarrow V_{th} = 2 \times 10 = 20 \text{ Volt}$

② i_{sc} KVL(1): $-10 - V_x + 2V_x = 0 \Rightarrow V_x = 10$

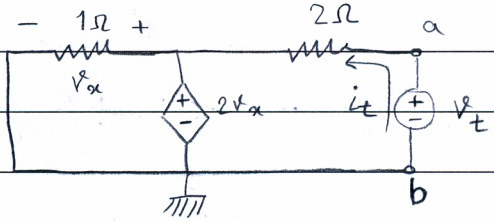
$i_{sc} = \frac{2V_x}{2\Omega} = \frac{20}{2} = 10\,A$ $\quad 2V_x = 20$

③ $R_{th} = \frac{V_{oc}}{i_{sc}} = \frac{20}{10} = 2\,\Omega$

نکته: چنانچه در مداری هم شامل منابع مستقل بود هم شامل منابع وابسته، برای محاسبه R_{th} می‌توانیم به روش زیر عمل کنیم.

1. تمام منابع مستقل را صفر می‌کنیم.
2. به دو سر a و b یک منبع ولتاژ مستقل فرضی به نام V_t اعمال می‌کنیم. و نام جریانی که اعمال شده به مدار را توسط این منبع می‌یابیم.
3. $R_{th} = \frac{V_t}{i_t}$

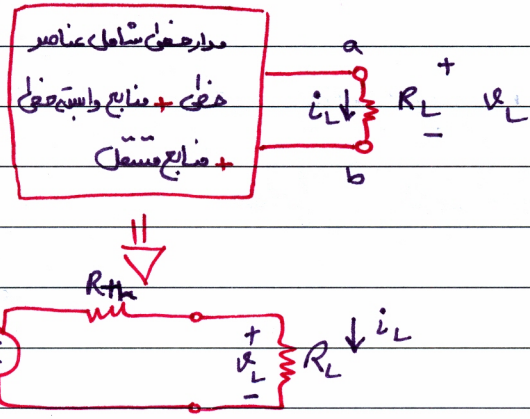
مثال قبل داریم:



i_t (جریانی که از مقاومت 2 اهمی می‌گذرد) $= \frac{V_t - 2V_x}{2} \xrightarrow{(I)} i_t = \frac{V_t}{2} \Rightarrow R_{th} = \frac{V_t}{i_t} = 2\,\Omega$

KVL $\Rightarrow -V_x + 2V_x = 0 \Rightarrow V_x = 0$ (I)

قضیه انتقال توان ماکسیمم



$$P_{RL}^{MAX} = R_L \times i_L^2 \qquad i_L = \frac{V_{th}}{R_L + R_{th}}$$

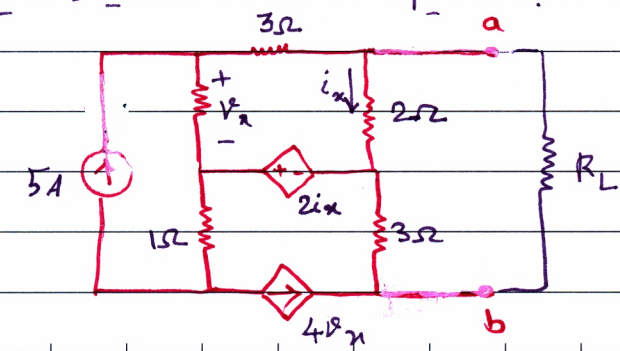
$$P_{RL} = R_L \times \left(\frac{V_{th}}{R_L + R_{th}}\right)^2$$

$(MAX)\ P_{RL}$ برای به دست آوردن : $\frac{dP_{RL}}{dR_L} = 0 \Longrightarrow R_L = R_{th}$

چنانچه $R_L = R_{th}$ باشد از طرف مدار، ماکسیمم توان به این مقاومت یا بار منتقل خواهد شد.

$$P_{RL}^{(Max)} = R_{th} \times \left(\frac{V_{th}}{R_{th} + R_{th}}\right)^2 = \frac{V_{th}^2}{4R_{th}}$$

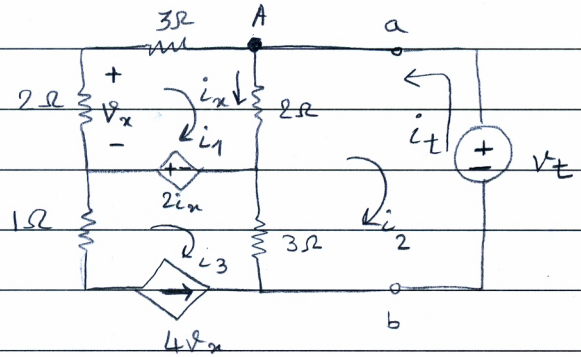
Example : در مدار شکل زیر R_L چقدر باشد تا از طرف مدار به آن ماکسیمم توان منتقل شود. اندازه‌ی این توان ماکسیمم چقدر است؟



اگر $P_{RL} = MAX \Longleftarrow R_L = R_{th}$

برای محاسبه R_{th} ابتدا منبع جریان مستقل را صفر (مدار باز) می‌کنیم سپس به دو سر ab یک منبع ولتاژ مستقل کمکی مثلاً V_t اعمال می‌کنیم

$$R_{th} = \frac{V_t}{i_t}$$



KVL(1): $2i_1 + 3i_1 + 2(i_1 - i_2) - 2i_x = 0$

KCL(A): $i_1 = i_x + i_2 \Rightarrow i_x = i_1 - i_2$ ← $(i_1 - i_2)$

$\Rightarrow 2i_1 + 3i_1 + 2(i_1 - i_2) - 2(i_1 - i_2) = 0 \longrightarrow \boxed{i_1 = 0}$

KVL(2): $+V_t + 3(i_2 - i_3) + 2(i_2 - i_1) = 0$

$\Rightarrow V_t + 5i_2 - 3i_3 = 0 \xrightarrow{i_3 = 0} V_t = -5i_2$

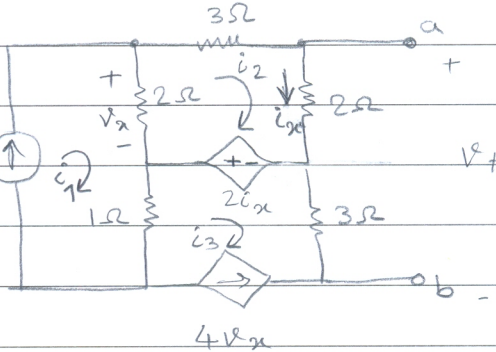
ازطرفی: $i_3 = -4v_x = -4(0) = 0$

طبق قانون اهم: $v_x = \frac{\text{ولتاژ دو سر مقاومت}}{\text{مقاومت}} = -2i_1 = -2 \times 0 = 0 \longrightarrow \boxed{v_x = 0}$ (2 اهمی)

$i_2 = -i_t \longrightarrow V_t = 5i_t \longrightarrow R_{th} = \frac{V_t}{i_t} = 5\,\Omega$

$$P_{MAX} = \frac{V_{th}^2}{4R_{th}}$$

$V_{th} = V_{oc}$



$V_{th} = V_{oc}$

$i_1 = 5A$

KVL(2) : $2(i_2 - i_1) + 3i_2 + 2i_2 - 2i_x = 0$ (i_2)

$i_x = i_2$

$5i_2 - 10 = 0 \Rightarrow i_2 = 2A$

$i_3 = -4V_x \Rightarrow i_3 = -4 \times 6 = -24\ A$

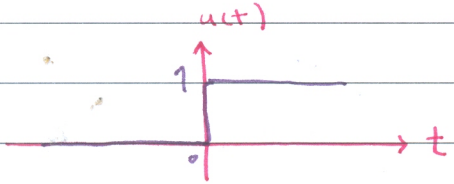
$V_x = 2(i_1 - i_2) = 2(5-2) = 6\ volt$

$V_{th} = 2 \times i_2 + 3 \times i_3 = 2 \times 2 + 3 \times -24 = -68\ volt$

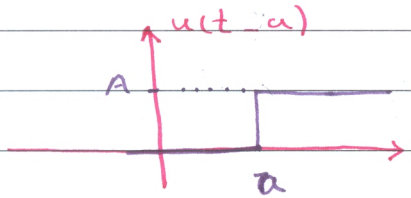
$$P_{max} = \frac{(-68)^2}{4 \times 5} = 231,2\ w \quad (\ddot{\smile})$$

معرفی چند تابع ویژه :

1/ تابع پله Step function : $u(t)$



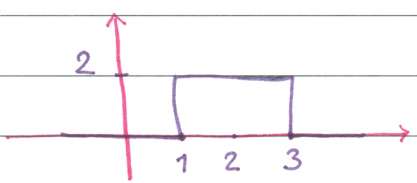
$$u(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$



$$A\,u(t-a) = \begin{cases} A & t \geq a \\ 0 & t < a \end{cases}$$

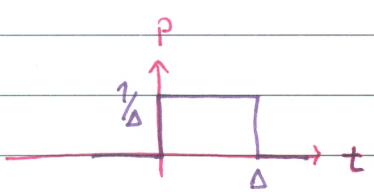
تبدیل تابع پالس به حاصل جمع چند تابع پله :

Example :

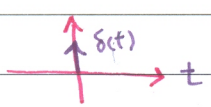


$$2u(t-1) - 2u(t-3)$$

2/ تابع ضربه Impulse function :



$$P_\Delta = \frac{1}{\Delta}\{u(t) - u(t-\Delta)\}$$



$$\lim_{\Delta \to 0} P_\Delta = \delta(t)$$ تابع ضربه

$$\delta(t) = \begin{cases} \text{مقدار ویژه} & t = 0 \\ 0 & t \neq 0 \end{cases}$$

$$\delta(t-a) = \begin{cases} \text{مقدار ویژه} & t = a \\ \text{صفر} & t \neq a \end{cases}$$

1) $\delta(t) = \frac{du(t)}{dt}$

2) $u(t) = \int_{-\infty}^{t} \delta(t)\,dt$

3) $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t)\,dt = 1$

4) $\int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\,\delta(t)\,dt = f(0)$

5) $\int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\,\delta(t-t_0)\,dt = f(t_0)$

6) $f(t) * \delta(t) = f(t)$

3/ توابع سینوسی :

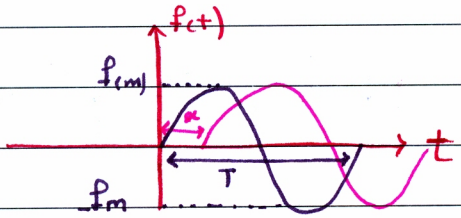
$f(t) = f_m \sin(\omega t + \varphi)$

f_m ← حداکثر دامنه

ω ← فرکانس زاویه‌ای

φ ← فاز

$f = \frac{1}{T}$ $\quad \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$



T ثانیه $\quad 360^\circ$

x ثانیه $\quad \varphi^\circ$

$\Rightarrow \varphi^\circ = \frac{x \times 360}{T}$

تحلیل مدارهای RC و RL مرتبه اول :

هدف از تحلیل مدارهای RC و RL بدست آوردن پاسخ این مدارها در حضور منابع تحریک مختلف می باشد.

منظور از پاسخ مدار مجاسب و ذخیره‌ساز انرژی و جریان سلف می باشد.

انواع پاسخ‌های مورد نظر عبارتند از :

1/ پاسخ طبیعی یا همان پاسخ ورودی صفر یا عمومی :

مجاسب و ذخیره‌ساز انرژی یا جریان سلف (مجاسب یا سلف مدار) در حالتی است که هیچ‌گونه منبع تحریک مستقل ورودی در مدار

وجود نداشته باشد و فعالیت مدار فقط ناشی از شرایط اولیه (ولتاژ اولیه خازن یا جریان اولیه سلف) باشد.

2/ پاسخ حالت صفر:

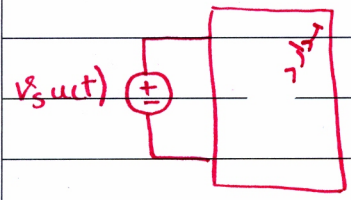
محاسبه پاسخ مدار زمانی که شرایط اولیه عالم بر مدار صفر باشد و فعالیت مدار فقط ناشی از منبع تحریک مستقل ورودی باشد.

3/ پاسخ به منابع تحریک مستقل ورودی یا پاسخ حالت ماندگار:

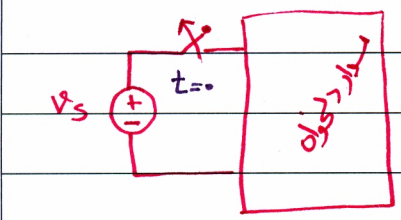
پاسخ مدار فقط به منابع تحریک مستقل ورودی.

4/ پاسخ پله:

پاسخ مدار زمانی که منبع تحریک ورودی مستقل از جنس تابع پله باشد.

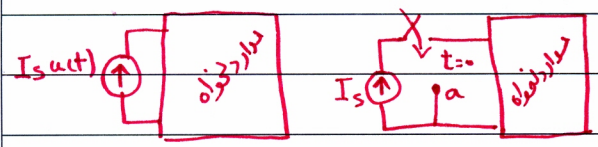


$$V_s\,u(t) = \begin{cases} V_s & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$



$$V_s = \begin{cases} V_s & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

یک تابع تحریک پله را می‌توانیم به صورت یک منبع DC به همراه یک کلید جابجایی لحاظ کنیم.



$$\begin{cases} I_s & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$