کاربرد تئوری گراف در حفاظت شبکه‌های قدرت

دکتر علیمحمد رنجبر- مهندس محمدرضا رکوعی

چکیده

در شبکه‌های قدرت بهم پیوسته و بزرگ هم‌آهنگی رله‌های دیستانس، جریان زیاد و اتصال زمین به روش دستی کاری بس دشوار و پیچیده است. بدین جهت امروزه تلاش می‌شود تا با استفاده از ریز کامپیوترها این مشکل را حل نمایند. اولین قدم در این راه تعیین کلیه حلقه‌های شبکه با استفاده از تئوری گراف است. پس از تعیین حلقه‌ها می‌توان به روشی که در مقاله دیگری در همین شماره مجله برق ارائه شده، نسبت به تعیین ترتیب هم‌آهنگی رله‌ها اقدام نمود. در این مقاله کاربرد تئوری گراف در تعیین کلیه حلقه‌های شبکه شرح داده شده است.

۱- مقدمه

در شبکه‌های شعاعی جهت هم‌آهنگ نمودن رله‌ها از دورترین رله نسبت به منابع تولید شروع نموده تا به رله‌های در محل منابع تولید برسیم. در شبکه‌های بهم پیوسته و حلقوی، انتخاب نقاط شروع به سادگی امکان‌پذیر نیست. به عنوان مثال اگر بدون هیچ ترتیب خاصی هم‌آهنگی رله‌ها را از یک نقطه دلخواه شروع نمائیم مجبوریم که تنظیم زمان اکثر رله‌های پشتیبان را از روی تنظیم رله‌هائی به‌دست آوریم که خودشان هنوز تنظیم نشده‌اند. این روش باعث می‌شود که تعداد بارهائی که رله‌ها را درتمام شبکه هم‌آهنگ می‌نمائیم بسیار زیاد شود.

بنابراین درشبکه‌های بهم پیوسته باید ترتیب هم‌آهنگی رله‌ها مشخص شود و برای تعیین ترتیب هم‌آهنگی رله‌ها باید حلقه‌های ساده شبکه مشخص گردند.

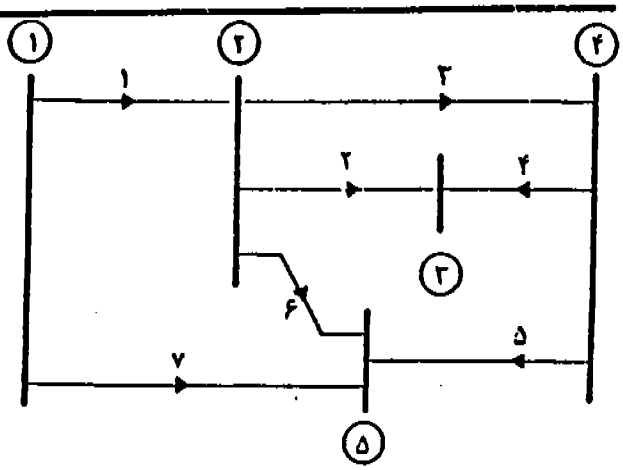
در این مقاله با استفاده از تئوری گراف چگونگی تعیین حلقه‌های ساده شرح داده می‌شوند. برای این کار ابتداء ماتریس تلاقی شبکه[1] نوشته‌شده و از روی آن ماتریس حلقه‌های اساسی شبکه[2] به دست می‌آیند. با استفاده از ماتریس حلقه‌های اساسی شبکه، کلیه حلقه‌های شبکه اعم از ساده و چندگانه[3] محاسبه می‌شده و سپس حلقه‌های چندگانه شناسائی و کنار گذاشته می‌شوند و بدین ترتیب کلیه حلقه‌های ساده شبکه به دست می‌آیند. در پایان، این حلقه‌ها به نحوی که گفته خواهد شد، جهت‌دار خواهند گردید. در مقاله‌دیگری در همین شماره مجله برق چگونگی استفاده از این حلقه‌ها را برای تعیین ترتیب هم‌آهنگی رله‌ها بیان خواهیم نمود.

۲- ماتریس تلاقی شبکه

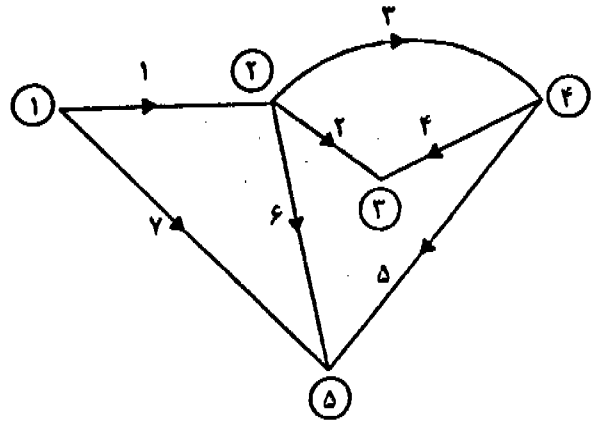
همتای ریاضی هر شبکه ماتریسی است که ماتریس تلاقی شبکه نام دارد. برای تشکیل این ماتریس در ابتدا گراف جهت‌دار شبکه را رسم می‌کنند. سپس درخت دلخواهی از این گراف را با مشخص نمودن شاخه‌ها و لینکها در آن معین نموده و خطهای آن را شماره‌گذاری می‌نمایند. دراین شماره ابتداء لینکها و بعداز آن شاخه‌ها درنظر گرفته می‌شوند. در شکل ۱ به عنوان نمونه قسمتی از یک شبکه قدرت و درشکل ۲ گراف جهت‌دار آن نشان داده شده است. از این به بعد از این شبکه به عنوان شبکه قدرت نمونه نامبرده می‌شود.

1. Incidence matrix
2. Basic loop matrix
3. Multiple loops

ماتریس تلاقی شبکه ← ماتریس حلقه‌های اساسی شبکه ← حلقه‌های ساده



شکل ۱ــ شمای یک شبکه قدرت نمونه با ۵ گره و ۷ خط



شکل ۲ــ گراف جهت‌دار شبکه قدرت نمونه

اگر تعداد کل گره‌های شبکه n و تعداد شاخه‌ها b باشد چون بین دو گره در یک درخت تنها یک شاخه وجود دارد، پس تعداد شاخه‌ها یکی کمتر از تعداد گره‌ها است یعنی:

$$b = n - 1$$

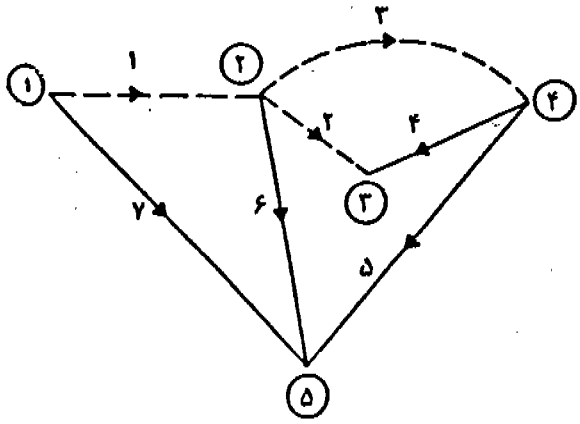
و اگر تعداد لینکها l و تعداد کل خطوط شبکه (مجموع شاخه‌ها و لینکها) e باشد، رابطه زیر برقرار است:

$$l = e - b = e - (n - 1) = e - n + 1$$

ماتریس تلاقی شبکه مطابق شکل ۴ است. عناصر این ماتریس (A_{ij}) از روی گراف شبکه به دست می‌آیند. مقدار A_{ij} اگر خط j ام از گره i ام خارج شود برابر یک و اگر به گره i ام وارد شود ۱ــ خواهد بود و درصورتی که بین خط i ام و گره i ام تلاقی وجود نداشته‌باشد مقدار آن صفر است. این ماتریس را با $\hat{A}$ نشان می‌دهیم وچون در شبکه‌ها همیشه یکی از گره‌ها به عنوان مرجع انتخاب می‌شود. در شماره‌گذاری گره‌ها، آخرین شماره را به این گره اختصاص می‌دهیم.

حال اگر سطر مربوط به این گره را در ماتریس $\hat{A}$ حذف نمائیم (یعنی آخرین سطر این ماتریس را حذف کنیم) ماتریسی به‌دست‌می‌آید که آن را ماتریس تلاقی مختصرشده[1] می‌نامند. این ماتریس را با A نشان می‌دهیم.

در شکل ۳ درخت شبکه نمونه به همراه شاخه‌ها و لینکهای آن نشان داده شده است. در شماره‌گذاری خطها ابتداء لینکها و سپس شاخه‌ها شماره‌گذاری می‌گردند.



شکل ۳ــ درخت شبکه نمونه با شاخه‌ها و لینکهای آن

در شکلهای ۴ و ۵ ماتریسهای $\hat{A}$ و A دیده می‌شود. ماتریس A را می‌توان به‌دو زیرماتریس A_b و A_l تفکیک‌نمود. زیرماتریس A_b شامل شاخه‌ها و زیرماتریس A_l شامل لینکها می‌باشد. این دو زیرماتریس به طور مستقل از یکدیگر در قسمتهای بعد مورد استفاده قرار می‌گیرند. درشکل ۶ ماتریس تفکیک شده A نشان داده شده است.

$\hat{A}$		خطهای شبکه						
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
گره	۱	۱						۱
	۲	۱-	۱	۱			۱	
	۳		۱-		۱			
	۴			۱-	۱-	۱		
	۵					۱-	۱-	۱-

شکل ۴ــ ماتریس تلاقی شبکه نمونه ($\hat{A}$)

1. Reduced incidence matrix

A		لینکها = l						
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
n - 1	۱	۱						۱
	۲	-۱	۱	۱			۱	
	۳		-۱		۱			
	۴			-۱	-۱	۱		

شکل ۵ ـ ماتریس تلاقی مختصر شده شبکه نمونه (A)

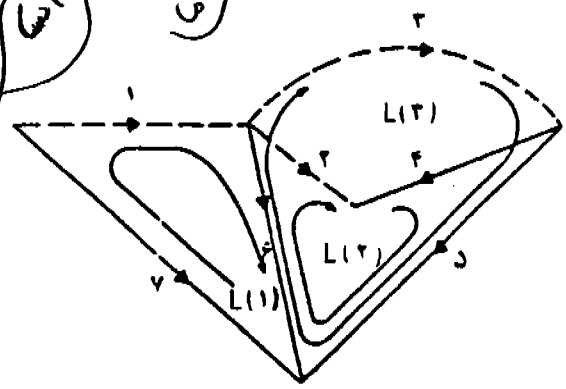
A	l	b
n-1	A_l	A_b

شکل ۶ـ ماتریس تفکیک شده A

۳ـ ماتریس حلقه‌های اساسی

در درخت یک گراف هیچ مسیر بسته‌ای (حلقه) وجود ندارد. به‌کمک هر لینک می‌توان حلقه‌ای ایجادکرد که شامل یک لینک و چند شاخه باشد. این حلقه را حلقه اساسی می‌نامند. مشخص است که تعداد حلقه‌های اساسی برابر تعداد لینکها است. چون برای هر حلقه باید جهتی در نظر گرفته شود، طبق قرارداد جهت هر حلقه را هم جهت با لینکی که آن حلقه را به وجود آورده است، درنظر می‌گیرند. همچنین شماره هر حلقه اساسی را با شماره لینک به وجود آورنده آن یکی می‌گیرند. ماتریس حلقه‌های اساسی مشخص می‌کند که هر حلقه اساسی شامل کدام لینکها و شاخه‌ها می‌باشد. عناصر این ماتریس (L_{ij}) به‌صورت زیر تعریف می‌شوند.

اگر خط j ام در حلقه اساسی i ام بوده و هم‌جهت با یکدیگر باشند L_{ij} را برابر ۱+ درنظر می‌گیرند و اگر خط j ام در حلقه اساسی i ام بوده و هم‌جهت با یکدیگر نباشند مقدار L_{ij} را برابر (۱-) قرار می‌دهند. و بالاخره اگر خط j ام در حلقه اساسی i ام نباشد مقدار L_{ij} را برابر صفر است. برای شبکه نمونه، حلقه‌های اساسی مطابق شکل ۷ می‌باشد و ماتریس حلقه‌های اساسی در شکل ۸ دیده می‌شود.



شکل ۷ـ حلقه‌های اساسی شبکه نمونه

L_B		لینکها = l						
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
حلقه‌های اساسی	۱	۱					۱	-۱
	۲		۱		-۱	۱	-۱	
	۳			۱		۱	-۱	

شکل ۸ـ ماتریس حلقه‌های اساسی شبکه نمونه

ماتریس حلقه‌های اساسی نیز شامل دو زیر ماتریس می‌باشد. و می‌توان آن را به صورت شکل ۹ نمایش داد.

L_B	l	b
حلقه‌های اساسی	I_l	L_b

شکل ۹ـ ماتریس تفکیک شده حلقه‌های اساسی

زیر ماتریس I_l، ماتریس یکه‌ای می‌باشد که دارای بعد (l×l) خواهد بود. زیرماتریس L_b نیز دارای بعد (l×b) می‌باشد. اگر بتوان زیرماتریس L_b را به طور غیرمستقیم به دست آورد، در واقع ماتریس حلقه‌های اساسی را به دست آورده‌ایم. این روش غیرمستقیمی است که می‌توان به کمک دو زیرماتریس A_l و A_b (شکل ۶) ماتریس حلقه‌های اساسی را به دست آورد. برای این کار باید رابطه زیر را که در مراحل دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد، اثبات نمود:

$$A \times L_B^T = 0 \qquad (۱)$$

سطرهای ماتریس A به سطرهای ماتریس B یا عمود می‌باشند.

رابطه فوق را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} A & e \\ n-1 & A_1 \quad A_b \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} L_B^T & 1 \\ e & I_1 \\ & L_b^T \end{bmatrix} = 0 \quad (۲)$$

این رابطه بیان می‌کند که سطرهای ماتریس A بر ستونهای ماتریس L_B^T عمودند و یا سطرهای ماتریس A بر سطرهای ماتریس L_B عمود می‌باشند. دراین حاصلضرب دیده می‌شود که باید هر سطر ماتریس A را به ترتیب در ستونهای ماتریس L_B^T ضرب کنیم. فرض کنیم که سطر i ام ماتریس A در ستون j ام ماتریس L_B^T ضرب می‌شود. با این کار تلاقی گره i ام و حلقه اساسی j ام را مورد بررسی قرار می‌دهیم. اگر گره i ام با حلقه اساسی j ام تلاقی نداشته باشد، حاصل ضرب صفر خواهد شد. اگر بین گره و حلقه تلاقی وجود داشته باشد بازهم حاصلضرب صفر خواهد بود زیرا که یک گره در یک حلقه اساسی فقط با دو شاخه از آن حلقه تلاقی خواهد داشت. به‌عبارت دیگر یک حلقه اساسی با یک شاخه وارد یک گره می‌شود و با شاخه دیگر از آن خارج می‌شود و چون ما برای شاخه‌ها جهت تعیین کرده‌ایم (در ماتریس A اعداد ۱+ یا ۱- قرار داده‌ایم) پس حاصلضرب بازهم صفر می‌شود. با استفاده از رابطه (۲) می‌توان روابط زیر را به سادگی نتیجه گرفت:

$$\begin{bmatrix} A_1 & A_b \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_1 \\ L_b^T \end{bmatrix} = 0$$

و یا:

$$A_1 + A_b \times L_b^T = 0$$

$$A_b \times L_b^T = -A_1$$

$$L_b^T = -A_b^{-1} \times A_1$$

پس:

$$L_b = (-A_b^{-1} \times A_1)^T$$

و درنتیجه ماتریس حلقه‌های اساسی با دانستن ماتریس تلاقی شبکه به صورت زیر قابل محاسبه است:

L_B	۱	b
حلقه‌های اساسی	I_1	L_b

=

L_B	۱	b
حلقه‌های اساسی	I_1	$-(A_b^{-1}A_1)^T$

با این کار توانستیم ماتریس حلقه‌های اساسی را به‌طور مستقل و فقط به کمک ماتریس A به دست آوریم.

۳- ماتریس کلیه حلقه‌های شبکه

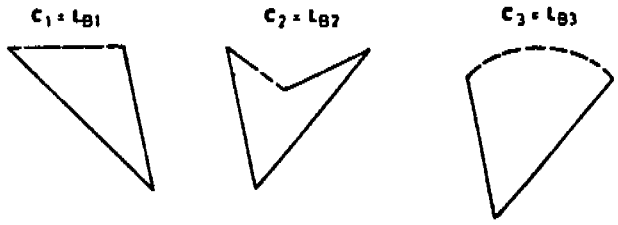
برای به دست آوردن ماتریس کلیه حلقه‌های شبکه ابتداء ماتریس L_B را بدون جهت می‌نمائیم. یعنی اگر تمام اعداد موجود در این ماتریس را مثبت درنظر بگیریم، به ماتریسی می‌رسیم که جهت عناصر در آن از بین رفته است. به چنین ماتریسی، ماتریس بدون جهت گویند و با $\bar{L}_B$ نمایش داده می‌شود. برای شبکه مورد بحث، ماتریس بدون جهت حلقه‌های اساسی به صورت زیر است:

$\bar{L}_B$		لینکها (۱)			شاخه‌ها (b)			
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
حلقه‌های اساسی	۱	۱					۱	۱
	۲		۱		۱	۱	۱	
	۳			۱		۱	۱	

=

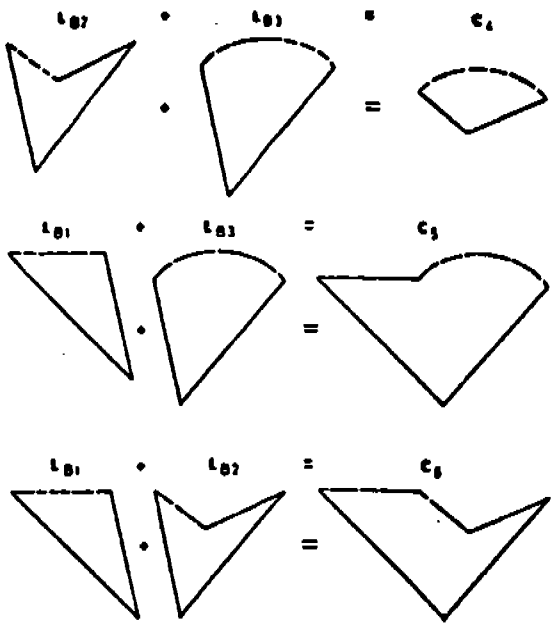
$\bar{L}_B$	۱	b
حلقه‌های اساسی	I_1	$\bar{L}_b$

کلیه حلقه‌های شبکه را می‌توان به کمک ترکیبهای مختلف حلقه‌های اساسی ایجاد کرد. برای این منظور باید ترکیب تک‌تک، دوتا دوتا، سه‌تا سه‌تا و... حلقه‌های اساسی را به دست آورد. در حالت کلی که l حلقه اساسی موجود باشد، تعداد کل حلقه‌ها برابر $2^l - 1$ خواهد بود. در زیر برای شبکه مورد بحث از نظر هندسی، کلیه حلقه‌ها را به‌دست آورده‌ایم. در جمع دو حلقه باید این موضوع را به یاد داشت که اگر شاخه‌ای مشترک در بین دو حلقه وجود داشته باشد، آن شاخه را حذف کنیم. در حالت کلی در جمع چند حلقه، اگر تعداد شاخه‌های مشترک زوج باشد آن شاخه را حذف می‌کنیم ولی اگر تعداد آنها فرد باشد آن‌را حذف نمی‌کنیم. حلقه‌های اساسی شبکه نمونه که آنها را با L_{B1}، L_{B2} و L_{B3} نشان می‌دهیم مطابق شکل ۱۰ است.

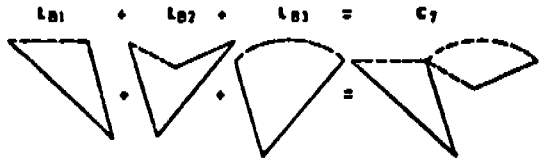


شکل ۱۰- حلقه‌های اساسی شبکه قدرت نمونه

جمع دو به دو این حلقه‌ها در شکل ۱۱ و جمع سه حلقه در شکل ۱۲ دیده می‌شود:



شکل ۱۱ــ جمع دو به دو حلقه‌های اساسی



شکل ۱۲ــ جمع سه حلقه اساسی شبکه نمونه

بنابراین از نظر ریاضی یافتن کلیه حلقه‌های شبکه باید به صورت زیر عمل کنیم:

$$
\begin{aligned}
C_1 &= L_{B1} \\
C_2 &= L_{B2} \\
C_3 &= L_{B3} \\
C_4 &= L_{B2} + L_{B3} \\
C_5 &= L_{B1} + L_{B3} \\
C_6 &= L_{B1} + L_{B2} \\
C_7 &= L_{B1} + L_{B2} + L_{B3}
\end{aligned}
\qquad (۳)
$$

تمام جمعهای فوق در پایه دوصورت می‌پذیرد. ترکیب‌کردن حلقه برای به‌دست‌آوردن حلقه‌های‌دیگر یکویژگی حلقه‌های پایه نیست. بلکه با ترکیب کردن هر جفت یا هر چند ازهر کدام از حلقه‌های فوق، حلقه‌ای به دست می‌آید که در مجموعه حلقه‌های فوق وجود دارد. به عنوان مثال اگر حلقه‌های C_4 و C_5 روبهم قرار داده و خطهای دو به دوی روبهم افتاده را حذف کنیم حلقه C_6 به دست می‌آید.

ضمانت و اعتبار علمی این نظریه مهم و جالب (یعنی دیده بسته بودن حلقه‌های یک شبکه را می‌توان در قالب ریاضی فضاهای برداری متناهی جستجو کرد.) کلیه حلقه‌های شبکه را می‌توان در ماتریسی به نام ماتریس حلقه‌ها نشان نمود. ماتریس (C) که از نتایج روابط (۳) به دست می‌آید در شکل ۱۳ ملاحظه می‌گردد.

C		لینکها (i)			ساحه‌ها (b)			
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
حلقه‌های اساسی	۱	۱					۱	۱
	۲		۱		۱	۱	۱	
	۳			۱		۱	۱	
حلقه‌های دیگر	۴		۱	۱	۱			
	۵	۱		۱		۱		۱
	۶	۱	۱		۱	۱		۱
	۷	۱	۱	۱	۱		۱	۱

شکل ۱۳ــ ماتریس کلیه حلقه‌های شبکه

ماتریس کلیه حلقه‌ها به‌صورت دو زیرماتریس تفکیک می‌شود. یکی زیر ماتریس حلقه‌های پایه و دیگر زیرماتریسی است که بقیه حلقه‌ها را نشان می‌دهد. متناظر با روش هندسی شکلهای ۱۱ و ۱۲، کلیه حلقه‌های مشخص شده در ماتریس حلقه‌ها را می‌توان از ترکیب ردیفهای ماتریس مدارهای‌پایه به دست آورد. بطورکلی، می‌دانیم که به تعداد 2^l ترکیب مختلف از l شئی متمایز L_{B1} ، L_{B2} ، ... L_{Bn} می‌توان تشکیل داد. برای محاسبه این ترکیبها کافی است که اشیاء فوق را به شکل یک بردار ستونی در ماتریسی به نام ماتریس ترکیبها (E) بیش ضرب نمائیم. ماتریس ترکیبها شامل اعداد باینری از ۱ تا 2^{l-1} می‌شود. ترتیب قرار گرفتن اعداد در این ماتریس به صورت زیر است:

در l سطر اول، اعداد باینری 2^0، 2^1، 2^2، ... و 2^{l-1} و در سطرهای دیگر اعداد باقیمانده بین ۱ تا 2^{l-1} به ترتیب شکل ۱۴ قرار گرفته‌اند. به عبارت دیگر در l سطر اول، توانهای مختلف عدد ۲ و در سطرهای دیگر اعداد باقیمانده وارد می‌شوند (همه این اعداد در پایه دو نوشته می‌شوند). این ماتریس که آن را E می‌نامیم مطابق شکل ۱۴ است.

E	l	
1	$2^{(l-1)}$	مقدار باینری عدد
	$2^{(l-2)}$	مقدار باینری عدد
	–	
	–	
	–	
	4	مقدار باینری عدد
	2	مقدار باینری عدد
	1	مقدار باینری عدد
2^l-1-1	3	مقدار باینری عدد
	5	مقدار باینری عدد
	6	مقدار باینری عدد
	–	
	–	
	–	
	$2^{(l-1)}$	مقدار باینری عدد

شکل ۱۴– ماتریس ترکیبها

ماتریس فوق را می‌توان به‌صورت دوزیرماتریس I_1 و E تفکیک نمود:

$$E = \begin{array}{|c|c|} \hline E & l \\ \hline 1 & I_1 \\ \hline 2^l-1-1 & \hat{E} \\ \hline \end{array}$$

برای شبکه نمونه ماتریس ترکیبها را به دست می‌آوریم. به دلیل آنکه در این شبکه تعداد لینکها برابر ۳ می‌باشد، تعداد کل حلقه‌های شبکه (تعداد سطرهای ماتریس) برابر 2^3-1 خواهد بود. این ماتریس مطابق شکل ۱۵ خواهد بود:

اکنون برای محاسبه کلیه حلقه‌های شبکه کافی است حاصل ضرب $E \times \bar{L}_B$ را به‌دست آوریم. به‌دلیل وجود زیرماتریس‌های واحد در هر دو ماتریس E و $\bar{L}_B$ حاصل‌ضرب فوق را همانطور

E			
مقدار باینری عدد ۴			۱
مقدار باینری عدد ۲		۱	
مقدار باینری عدد ۱	۱		
مقدار باینری عدد ۳	۱	۱	
مقدار باینری عدد ۵	۱		۱
مقدار باینری عدد ۶		۱	۱
مقدار باینری عدد ۷	۱	۱	۱

شکل ۱۵– ماتریس ترکیبها برای شبکه نمونه

که در زیر نشان داده شده است، می‌توان به صورت ساده‌ای تبدیل کرد:

$$C = E \times \bar{L}_B = \begin{array}{|c|c|} \hline E & l \\ \hline 1 & I_1 \\ \hline 2^l-1-1 & \hat{E} \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline \bar{L}_B & l & b \\ \hline 1 & I_1 & \bar{L}_b \\ \hline \end{array}$$

و یا:

$$C = \begin{array}{|c|c|c|} \hline C & l & b \\ \hline 1 & I_1 & \bar{L}_b \\ \hline 2^l-1-1 & \hat{E} & \hat{E} \times \bar{L}_b \\ \hline \end{array}$$

مشاهده می‌شود که برای به دست آوردن ماتریس C تنها کافی است حاصل‌ضرب $E \times \bar{L}_b$ را به‌دست آوریم. درمورد ماتریس حلقه‌های شبکه مورد بحث، کافی است در ابتدا حاصل‌ضرب فوق را به صورت ضرب معمولی انجام داده و بعد اعداد زوج را به عدد "صفر" و اعداد فرد را به عدد "۱" تبدیل کنیم:

$$\hat{E} \times \bar{L}_b = \begin{array}{|c|c|} \hline \hat{E} & l \\ \hline \cdots & \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline & & & \\ \hline & & & \\ \hline & & & \\ \hline & & & \\ \hline \end{array} \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|c|} \hline \bar{L}_b & b \\ \hline & \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline & & & \\ \hline & & & \\ \hline & & & \\ \hline \end{array} \\ \hline \end{array}$$

و یا:

$$\hat{E} \times \bar{L}_b = \begin{array}{c|cccc} & b & & & \\ \hline 2^l-1-1 & 1 & 2 & 2 & \\ & & 1 & 2 & 1 \\ & 1 & 1 & 2 & 1 \\ & 1 & 2 & 3 & 1 \end{array}$$

و به کمک این حاصل‌ضرب، ماتریس C که همان ماتریس شکل ۱۳ خواهد بود به دست می‌آید. این ماتریس شامل کلیه حلقه‌های شبکه اعم از ساده و چندگانه می‌باشد.

۴ـ شناسائی حلقه‌های چندگانه و حذف آنها از حلقه‌های شبکه

چنانچه در بخش قبلی مشاهده کردیم، با ترکیب حلقه‌های اساسی، می‌توان کلیه حلقه‌های شبکه را، اعم از ساده و چندگانه به دست آورد. هدف اصلی در بسیاری از کاربردها تعیین حلقه‌های ساده و حذف حلقه‌های چندگانه می‌باشد. به عنوان مثال در شکل ۱۲ از ترکیب حلقه‌های اساسی C_1، C_2 و C_3، حلقه چندگانه C_7 حاصل می‌شود. این نوع حلقه‌ها در حفاظت شبکه‌ها کاربردی نداشته و به صورت حلقه‌های زائدی هستند که باید در مجموعه حلقه‌ها شناسائی و حذف شوند. یک حلقه چندگانه عبارت از حلقه‌ای است از دو یا چند حلقه ساده تشکیل شده باشد. به عبارت دیگر اگر مجموعه اضلاع حلقه‌ای شامل مجموعه حلقه‌های یک مدار دیگر بشود، آن حلقه یک حلقه چندگانه خواهد بود. به عنوان مثال در شکلهای ۱۱ و ۱۲ کلیه اضلاع حلقه C_4 در حلقه C_7 وجود دارند پس حلقه C_7 یک حلقه چندگانه است. برای اینکه این ویژگی را به شکل جبری و محاسباتی بیان کنیم کافی است که در جستجوی روشی باشیم که تعداد اضلاع مشترک هر حلقه را با خودش و با هر یک از حلقه‌های دیگر شبکه در حساب معمولی به ما بدهد. به عنوان مثال، در شکل ۱۶، ماتریس شمارش اضلاع در حلقه‌های شبکه قدرت مورد مثال را براساس ماتریس C از شکل ۱۲ به‌دست آورده‌ایم این ماتریس به نام ماتریس D نامیده شده است.

بوضوح دیده می‌شود که ماتریس شمارش اضلاع مشترک در حلقه‌ها یک ماتریس متقارنی است که روی قطر آن تعداد اضلاع هر حلقه داده شده است و در مواضع دیگر، تعداد اضلاع مشترک بین دو حلقه متمایز آمده است. مثلاً در ردیف اول در موضع

D		حلقه‌ها						
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
حلقه‌ها	۱	۳	۱	۱	۰	۲	۲	۳
	۲		۴	۲	۲	۱	۳	۳
	۳			۳	۱	۲	۱	۲
	۴				۳	۱	۲	۳
	۵					۴	۳	۳
	۶						۵	۴
	۷							۶

شکل ۱۶ـ ماتریس شمارش اضلاع مشترک در مدارها

D_4 می‌بینیم که در حلقه C_1 سه ضلع وجود دارد. از طرفی نیز می‌بینیم که در موضع D_{17}، حلقه C_1 با حلقه C_7 دارای سه ضلع مشترک است. پس حلقه C_7 کلیه اضلاع حلقه C_1 را دربردارد. پس حلقه C_7 می‌بایستی یک حلقه چندگانه باشد. در ردیف چهارم ماتریس D نیز وضع مشابهی وجود دارد که حاکی از این است که حلقه C_7 چهار ضلع حلقه C_4 را نیز در بردارد. پس حلقه C_7 از دو حلقه C_1 و C_4 تشکیل شده است. باتوجه به روش فوق، کاملاً واضح است که به‌آسانی می‌توان حلقه‌های چندگانه را از حلقه‌های ساده تمیز داد.

برای محاسبه تعداد اضلاع مشترک بین دو حلقه C_i و C_j کافی است که سطرهای متناظر با آنها را در ماتریس C در حساب معمولی در هم ضرب و سپس باهم جمع نمائیم. بیان ریاضی عمل فوق این است که ماتریس C را در وارونه خودش و در حساب معمولی ضرب نمائیم تا ماتریس D به دست آید، پس می‌توان نوشت:

$$D = C \times C^T$$

اگر رابطه فوق را حساب نمائیم همان ماتریس شکل ۱۶ به‌دست می‌آید. با استفاده از ماتریس D کلیه حلقه‌های چندگانه شناسائی می‌شوند. برای این کار کافی است سطرهای ماتریس D بررسی شوند درصورتی که در سطر i ام عنصر قطری D_{ii} با عنصر D_{ij} برابر باشد حلقه شماره j یک حلقه چندگانه خواهد بود. و بدین ترتیب کلیه حلقه‌های چندگانه مشخص می‌شوند. بعد از مشخص شدن حلقه‌های چندگانه به دو روش

می‌توان آنها را حذف نمود:

الف ـ این حلقه‌ها را مستقیماً از ماتریس C حذف می‌کنیم و ماتریس جدید C_S را که فقط شامل حلقه‌های ساده است به دست می‌آوریم.

ب ـ سطرهای متناظر با حلقه‌های چندگانه را در ماتریس ترکیبها (E) حذف می‌کنیم تا ماتریس ترکیبهای ساده (E_S) به دست آید و سپس به ترتیب زیر، ماتریس حلقه‌های ساده C_S را محاسبه می‌نمائیم:

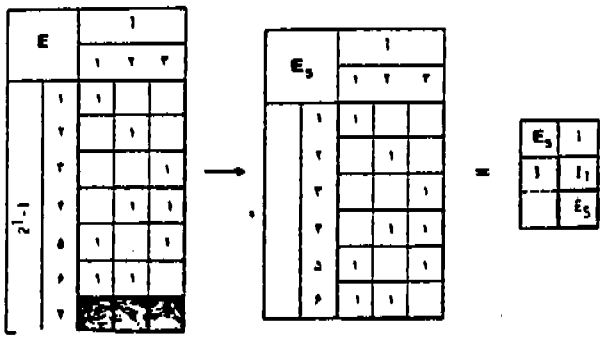
$$C_S = E_S \times \bar{L}_B \qquad (۴)$$

این روش به دلیل آنکه در جهت‌دار کردن حلقه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد ترجیح داده می‌شود. مطابق روش اول برای شبکه مورد بحث، چون حلقه شماره ۷ یک حلقه چندگانه است، باید سطر هفتم را از ماتریس C حذف نمائیم تا ماتریس جدید C_S مطابق شکل ۱۷ به دست آید.

C_S		(l) لینکها			(b) شاخه‌ها			
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
حلقه‌های ساده	۱	۱					۱	۱
	۲		۱		۱	۱	۱	
	۳			۱		۱	۱	
	۴		۱	۱	۱			
	۵	۱		۱		۱		۱
	۶	۱	۱		۱	۱		۱

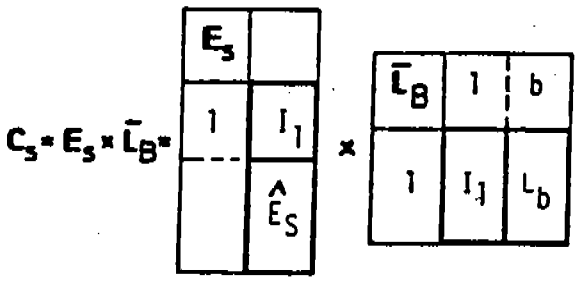
شکل ۱۷ـ ماتریس کلیه حلقه‌های ساده

اگر بخواهیم از روش دوم، ماتریس حلقه‌های ساده (C_S) را به دست آوریم باید سطرهای متناظر با حلقه‌های چندگانه را در ماتریس E حذف کنیم و ماتریس جدید به‌دست‌آمده (E_S)

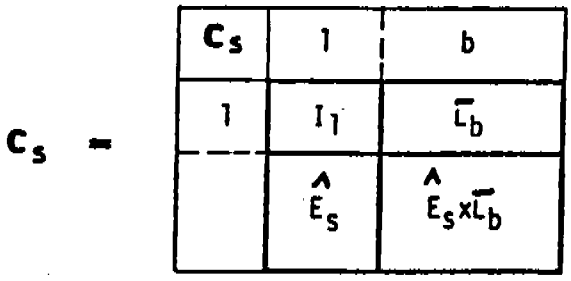


را که به آن ماتریس ترکیبهای ساده گفته می‌شود در ماتریس حلقه‌های اساسی جهت‌دار در پایه ۲ ضرب نمائیم. برای به دست آوردن ماتریس ترکیبهای ساده برای شبکه مورد بحث می‌باید سطر ۷ از ماتریس E حذف شود:

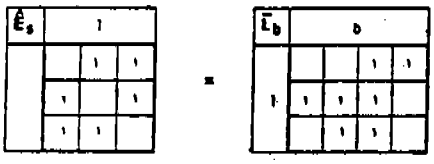
به دلیل آنکه ماتریس E_S شامل دو زیر ماتریس است می‌توان حاصلضرب $E_S \times \bar{L}_B$ را ساده‌تر نمود:



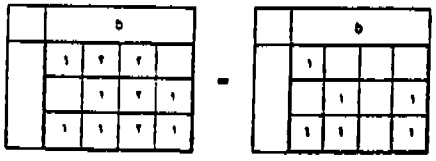
و یا:



ماتریس C نیز مانند ماتریس C شامل چهار زیرماتریس است که تنها باید زیرماتریس $\hat{E}_S \times \bar{L}_b$ را محاسبه کرد. برای این کار ابتدا حاصلضرب $\hat{E}_S \times \bar{L}_b$ را محاسبه کرده و بعد آن را به پایه دو تبدیل می‌کنیم:



و یا:



پس از این، ماتریس حلقه‌های ساده (C_S) مطابق شکل ۱۸ به راحتی به دست می‌آید:

C_s		(l) لینکها			(b) شاخه‌ها			
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
حلقه‌های ساده	۱	۱					۱	۱
	۲		۱		۱	۱	۱	
	۳			۱		۱	۱	
	۴		۱	۱	۱			
	۵	۱		۱		۱		۱
	۶	۱	۱		۱	۱		۱

شکل ۱۸ـ ماتریس حلقه‌های ساده شبکه قدرت نمونه

۴ـ جهت‌دارکردن حلقه‌های ساده شبکه

ماتریس حلقه‌های ساده به دست آمده در قسمت قبل بدون جهت است که باید آن را جهت‌دار کرد. ماتریس C_S فقط نشان می‌دهد که هر حلقه ساده شامل کدام خط‌ها می‌باشد. به دلیل جهت‌دار بودن گراف شبکه اگر جهت دلخواهی برای هر حلقه درنظر بگیریم (جهت انتخابی کاملاً دلخواه است)، جهت بعضی از خطهای موجود در حلقه، موافق جهت انتخابی برای حلقه خواهند بود و برای برخی دیگر از خطها، جهت حلقه و جهت خط مخالف یکدیگر خواهند شد. منظور از جهت‌دار کردن حلقه‌ها این است که در ماتریس C_S برای آن خطی که در خلاف جهت حلقه می‌باشد، عدد "۱" را به عدد "۱ـ" تبدیل کنیم و بقیه اعداد را بدون تغییر باقی بگذاریم. همانطور که قبلاً دیدیم برای به دست آوردن ماتریس حلقه‌های شبکه ازرابطه (۴) که حلقه‌های پایه بدون جهت را جمع می‌نمود استفاده نمودیم. اکنون اگر بتوان حلقه‌های اساسی جهت‌دار (L_B) را با یکدیگر به‌ترتیبی جمع کرد که خطهای مشترک در حلقه‌ها در خلاف جهت بایکدیگر جمع شوند، در آن صورت خطهای مشترک حذف شده و حلقه‌های جدید به‌وجود آمده، حلقه‌های جهت‌دار خواهند بود. بنابراین برای محاسبه ماتریس کلیه حلقه‌های ساده جهت‌دار که آن را با C_{sd} نمایش می‌دهیم باید حلقه‌های پایه جهت‌دار ماتریس L_B را در تمام جهات ممکن باهم جمع نمود. برای این کار بجای استفاده از ماتریس ترکیبها یعنی E_S از ماتریس ترکیبهای جهت‌دار که آن را با E_{sd} نمایش می‌دهیم استفاده می‌نمائیم. ماتریس E_{sd} از روی ماتریس E_S بدین ترتیب به دست می‌آید که هر سطر ماتریس E_S را با تبدیل اعداد ۱ به ۱ـ به چندین سطر تبدیل می‌نمائیم. ماتریس E_S سرانجام دو زیر ماتریس I_1 و $\hat{E}_{sd}$ تشکیل می‌شود. زیرماتریس I_1 حلقه‌های پایه را نشان می‌دهد و لزومی به‌تبدیل اعداد ۱+ آن به ۱ـ وجود ندارد. زیرماتریس $\hat{E}_S$ است که حلقه‌های پایه را باهم جمع می‌نماید و سطرهای این ماتریس است که باید کسر داده شود. اگر جهت‌دار شده زیرماتریس E_S را با $\hat{E}_{sd}$ نشان دهیم ماتریس ترکیبهای جهت‌دار E_{sd} مطابق شکل ۱۹ خواهد بود:

E_{sd}	1
1	I_1
	$\hat{E}_{sd}$

لزوم ندارد

شکل ۱۹ـ ماتریس ترکیبهای جهت‌دار

اکنون برای محاسبه ماتریس C_{sd} می‌توان روابط زیر را نوشت:

$$C_{sd} = E_{sd} \times L_B$$

و یا:

$$C_{sd} = \begin{array}{|c|c|}\hline E_{sd} & 1 \\ \hline 1 & I_1 \\ \hline & \hat{E}_{sd} \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|c|c|}\hline L_B & 1 & b \\ \hline 1 & I_1 & L_b \\ \hline \end{array}$$

و یا:

$$C_{sd} = \begin{array}{|c|c|c|}\hline C_{sd} & 1 & b \\ \hline 1 & I_1 & L_b \\ \hline & \hat{E}_{sd} & \hat{E}_{sd} \times L_b \\ \hline \end{array}$$

ماتریس اخیر دقیقاً شبیه ماتریس C_S می‌باشد با این تفاوت که زیرماتریس $\hat{E}_S$ به $\hat{E}_{sd}$ تبدیل شده است. اگر بتوانیم زیر

ماتریس $\hat{E}_{sd}$ را به دست آوریم ، ماتریس C_{sd} به دست‌آمده است. E_{sd} جهت‌دار شده $\hat{E}_S$ است به نحوی که‌ازطریق آن بتوان ترکیبهای مناسب حلقه‌های اساسی را پیدا نمود. برای این کار ابتدا باید سطرهای $\hat{E}_S$ را به نحوی گسترش دهیم که تمام ترکیبهای ممکنه حلقه‌های اساسی را به دست دهد و آنگاه ترکیبهای نامناسب حذف شده و حلقه‌های‌ساده جهت‌دار محاسبه شوند. برای روشن شدن موضوع، عمل جهت‌دار کردن حلقه‌ها را برای شبکه نمونه انجام می‌دهیم.

یکی از صور گسترش سطرهای $\hat{E}_S$ به قرار زیر است. ماتریس حاصل را E'_S نام‌گذاری نموده‌ایم:

E'_S

	۱	۱
	۱	-۱
۱		۱
۱		-۱
۱	۱	
۱	-۱	

شکل ۲۰- گسترش سطرهای ماتریس E_S

در اینجا سطر اول $\hat{E}_S$ را که به صورت (۱ ۱ ۰) می‌باشد به دو سطر (۱ ۱ ۰) و (۱- ۱ ۰) و گسترش‌داده‌ایم درهمین‌جا می‌توانیم سطرهای (۱ ۱- ۰) و (۱- ۱- ۰) را نیز اضافه نمائیم. منتهی چون اضافه‌کردن این سطرها حلقه‌های جدیدی ایجاد نمی‌نمایند از نوشتن‌آنها خودداری شده است. در سطر (۱ ۱ ۰) حلقه‌های L_{B2} و L_{B3} و در سطر (۱- ۱ ۰) حلقه‌های L_{B2} و $-L_{B3}$ باهم جمع می‌شوند. اگر سطرهای (۱ ۱- ۰) و (۱- ۱- ۰) رااضافه‌می‌نمودیم، توسط‌آنهاجمع حلقه‌های (L_{B3} ، $-L_{B3}$) و ($-L_{B2}$ - L_{B3}) به‌دست می‌آید که همان حلقه‌های‌قبلی می‌بودند و به این دلیل از اضافه‌کردن آنها خودداری شده است. به همین ترتیب سطرهای دوم و سوم ماتریس $\hat{E}_S$ نیز گسترش داده شده‌اند البته در گسترش هر سطر باید انواع ترکیبهای ممکن را درنظر گرفت و سپس ترکیبهای نامناسب‌را حذف‌نمود. پس‌از محاسبه‌ماتریس E'_S حاصل‌ضرب $E'_S \times L_b$ را به دست می‌آوریم. برای مثال فوق خواهیم داشت:

E'_S

	۱	۱
	۱	-۱
۱		۱
۱		-۱
۱	۱	
۱	-۱	

$E'_S \times L_b =$

-۱	۲	-۲	
-۱			
	۱		-۱
	-۱	۲	-۱
-۱	۱		-۱
۱	-۱	۲	-۱

سطرهای مطلوب

در ماتریس اخیر می‌توان دید که سطرهای مطلوب‌کدام سطرها هستند و یا به عبارت ساده‌تر، می‌توان ترکیبهای مناسب را شناسائی کرد. سطرهای ۴، ۱ و ۶ به دلیل آنکه دارای‌اعداد ۲ یا ۲- هستند قابل قبول نمی‌باشند (نامناسب هستند). بدین ترتیب سطرهای نامناسب را از ماتریس حذف می‌کنیم، درنتیجه زیرماتریس جهت‌دار شده $\hat{E}_{sd}$ به دست می‌آید. برای‌مثال، سطرهای ۴، ۱ و ۶ را از ماتریس E'_S حذف می‌کنیم تا زیرماتریس $\hat{E}_{sd}$ به دست آید:

E'_S

	۱	۱
	۱	-۱
۱		۱
۱		-۱
۱	۱	
۱	-۱	

تبدیل میشود →

$\hat{E}_{sd}$

	۱	-۱
۱		۱
۱	۱	

حال‌که زیرماتریس $\hat{E}_{sd}$ به‌دست‌آمد حاصل‌ضرب $\hat{E}_{sd} \times L_b$

و یا:

$E'_S \times L_b =$

-۱	۲	-۲	
-۱			
	۱		-۱
	-۱	۲	-۱
-۱	۱		-۱
۱	-۱	۲	-۱

سطرهای مطلوب

(رابطه ۲۴) را محاسبه می‌نمائیم :

$$\hat{E}_{sd} \times L_b = \begin{array}{|ccc|} & 1 & -1 \\ 1 & & 1 \\ 1 & 1 & \end{array} \times \begin{array}{|cccc|} & & 1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & \\ & 1 & -1 & \end{array}$$

و یا :

$$\hat{E}_{sd} \times L_b = \begin{array}{|cccc|} -1 & & & \\ & 1 & & -1 \\ -1 & 1 & & -1 \end{array}$$

در این مرحله به راحتی می‌توانیم ماتریس C_{sd} را به دست آوریم زیرا هر چهار زیرماتریس C_{sd} مشخص می‌باشند. این ماتریس شامل کلیه حلقه‌های ساده جهت‌دار شبکه است :

$$\begin{array}{|cc|} C_{sd} & 1 \\ 1 & L_1 \\ & \hat{E}_{sd} \end{array} \begin{array}{|c|} b \\ L_b \\ \hat{E}_{sd} \times L_b \end{array} = \begin{array}{|c|ccccccc|} C_{sd} & & & & & & & \\ & & 1 & 1 & 2 & 2 & 5 & 6 & 7 \\ \text{شماره شاخه جهت‌دار} & 1 & 1 & & & & & 1 & -1 \\ & 2 & & 1 & & -1 & 1 & -1 & \\ & 3 & & & 1 & & 1 & -1 & \\ & 4 & & 1 & -1 & -1 & & & \\ & 5 & 1 & & 1 & & 1 & & -1 \\ & 6 & 1 & 1 & & -1 & 1 & & -1 \end{array}$$

۵ ـ نتیجه

در این مقاله ماتریس کلیه حلقه‌های جهت‌دار یک شبکه قدرت محاسبه گردید. الگوریتم محاسبه به ترتیب زیر بود :

الف ـ ماتریس ارتباطهای مختصرشده شبکه (A) نوشته می‌شود و از آن زیرماتریس‌های A_b و A_1 به‌دست می‌آیند.

ب ـ با استفاده از A_b و A_1 ماتریس حلقه‌های اساسی شبکه یعنی L_B محاسبه می‌شود و از آنجا ماتریس حلقه‌های اساسی بدون جهت شبکه یعنی $\bar{L}_B$ نتیجه می‌گردد.

ج ـ با تشکیل ماتریس ترکیبها E و ضرب آن در ماتریس $\bar{L}_B$ ($E \times \bar{L}_B$)، ماتریس کلیه حلقه‌های شبکه یعنی C به دست می‌آید.

د ـ از رابطه $D = C \times C^T$ ماتریس شمارش اطلاع محاسبه شده و از آن حلقه‌های مرکب شناسائی و از ماتریس C حذف می‌شوند. بدین ترتیب ماتریس C_S که دربردارنده کلیه حلقه‌های ساده شبکه است نتیجه می‌شود.

هـ ـ با گسترش ماتریس ترکیبها (E_S)، می‌توان ماتریس ترکیبهای جهت‌دار یعنی E_{sd} را بدست آورد و سپس از رابطه $C_{sd} = E_{sd} \times L_B$ ماتریس کلیه حلقه‌های جهت‌دار شبکه محاسبه می‌گردد.

۶ ـ مراجع

1- R.E. Albrecht, M. S. Nisja , W.E. Feero, G.D. Rockefeller and C.L. Wagner, "Digital Computer Device Coordination program -I. General Program Description", IEEE Transactions on PAS , Vol. 83, No. 4,April 1964, pp. 402-420.

2- D E. Schultz and S.S. Waters , "Computer-Aided Protective Device Coordination A Case Study" , IEEE Transaction on PAS , Vol. PAS-103 , No. 11, November 1984,PP.3296-3301.

3- S.S. Begian, R.O. Bigelow,D.M. Lyle "A computer Approach for Setting Overcurrent Relays in a Network" IEEE PICA Conference Record , Vol. 31C69,May 1967, pp. 447-457.

4- W. M. Thorn, R.G. Elliott and I.N. Friedman, " A Computer Program for Setting Transmission Line Relays" Proceedings of American Power Conference, Vol. 35, Chicago, 8-10 May 1973, pp 1973, pp. 1025-1034.

5- Y. Oura, T. Matuda, T. Kasahara, K. Kobayashi, S. Ogihara , T. Itoh, "Interactive Computation system for Relay Setting and Simulation of Relay Operation in A Large Scale EHV Power Systems" , IEEE Transactions on PAS,Vol. PAS-104, July 1985, PP. 1767-773.

تعیین ترتیب هم‌آهنگی رله‌ها با ریزپردازنده‌ها

دکتر علیمحمد رنجبر- مهندس محمدرضا رکوعی

چکیده

یک شبکه قدرت بهم پیوسته و بزرگ ، دارای تعداد زیادی رله‌های جریان زیاد ، اتصال زمین و دیستانس و غیره است . سئوالی که مطرح است این است که برای تنظیم و هم‌آهنگی این رله‌ها از چه رله و یا رله‌هایی آغاز کنیم و به چه ترتیبی رله‌ها را یکی پس‌از دیگری تنظیم نمائیم . در این مقاله پاسخ این سئوال تعیین گردیده است .

۱- مقدمه

در یک شبکه بهم پیوسته و بزرگ تعداد زیادی رله‌های جریان زیاد ، اتصال زمین ، دیستانس و غیره وجود دارد . برای تنظیم و هم‌آهنگی این رله‌ها باید از یک و یا چند رله شروع نمائیم . به عبارت دیگر باید ابتداء یک یا چندرله را تنظیم کنیم و سپس برمبنای آنها بقیه رله‌ها را تنظیم نمائیم . یک شبکه بهم پیوسته دارای تعداد زیادی حلقه است . رله‌های هر حلقه باید باهم ، هم‌آهنگ باشند . بنابر این در هر حلقه شبکه می‌باید یک رله انتخاب و آن‌را تنظیم نمود و سپس بقیه رله‌های آن حلقه را برمبنای آن یک رله تنظیم کرد .یک‌رله ممکن است در چندین حلقه مشترک باشد و بنابراین با انتخاب یک رله ، ممکن است بتوان رله‌های چندین حلقه را تنظیم و هم‌آهنگ نمود . انتخاب حداقل تعداد رله‌هایی که در ابتداء باید تنظیم شوند تا بر مبنای آنها بتوان کلیه رله‌های دیگر شبکه را تنظیم و هم آهنگ نمود ، اولین موضوعی است که در این مقاله مورد بحث قرار می‌گیرد . اگر حلقه‌های شبکه را در نقاطی که این رله‌ها در آن قرار دارند باز کنیم ، کلیه حلقه‌های شبکه باز می‌شوند و لذا به نقاطی از شبکه ، که این رله‌ها در آنها قرار دارند نقاط شکست[1] شبکه هم گفته می‌شود . پس از تعیین نقاط شکست ، رله‌های واقع در آنها در اولین مرحله هم‌آهنگی تنظیم می‌شوند . دومین موضوعی که در این مقاله مطرح‌است این است که پس‌از تنظیم رله‌های واقع درنقاط شکست ،کدام رله و یا رله‌های دیگر را می‌توان تنظیم نمود؟ و به عبارت دیگر سری دوم رله‌هایی که باید تنظیم شوند کدامند؟ این رله‌ها نیز مشخص می‌شوند و پس از آن سری سوم و چهارم و به‌طورکلی رله یا رله‌هایی که یکی پس از دیگری باید تنظیم شوند تعیین‌می‌گردند .رله‌های مذکور به ترتیب در یک‌بردار به نام بردار ترتیب هم‌آهنگی (RSV)[2] ذخیره می‌گردند . در تمام مراحل فرق اساسی کار براین است که ، رله‌ای قابل تنظیم است که رله‌های اصلی[3] آن قبلاً تنظیم شده باشند . آخرین موضوعی که در این مقاله مورد بحث قرار می‌گیرد این است که هر رله‌ای در شبکه دارای یک یا چند رله اصلی است و تنظیمات این رله می‌باید با درنظر گرفتن مشخصات و تنظیمات رله‌های اصلی آن مشخص شوند . بنابراین برای هر رله باید معلوم شود که‌رله‌های‌اصلی آن کدامند . ماتریسی که کلیه رله‌های اصلی هر رله را نشان می‌دهد ماتریس BPM[4]

---

1. *Break Points*
2. *Relative Sequence Vector*
3. *Primary Relays*
4. *Back -UP & Primary Matrix*

است حاصل‌ضرب بردار NRL در ماتریس L_D محاسبه گردد. نتیجه به‌صورت برداری است که آن را با NRT نمایش می‌دهیم:

برای شبکه مورد بحث NRT به صورت زیر است:

NRT =

NRT	شماره رله‌ها													
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
مجموع رله‌های هر حلقه	۱۲	۱۲	۱۰	۱۲	۱۰	۱۰	۱۲	۱۲	۱۲	۱۰	۱۲	۱۰	۱۰	۱۲

پس از تعیین بردارهای NRL و NRT برای تعیین نقاط شکست به ترتیب زیر عمل می‌نمائیم:

حلقه‌ای که دارای کمترین تعداد رله در بردار NRL است انتخاب می‌شود. درصورتی‌که بیش از یک حلقه دارای کمترین تعداد رله باشند به‌طور دلخواه یکی از آنها اختیار می‌شود. بعد رله‌های حلقه انتخابی مشخص می‌شوند و از بین آنها، رله‌ای که در بردار NRT دارای بیشترین تعداد رله‌های هم‌حلقه است به عنوان یک نقطه شکست برگزیده می‌گردد. پس از تعیین این رله کلیه حلقه‌هایی که این رله در آنها قرار دارد کنار گذاشته می‌شوند. زیرا در تمام این حلقه‌ها، رله‌ای برای شروع کار هم‌آهنگی به دست آمده است. و لذا در ماتریس L_D، تمام سطرهای مربوط به این حلقه‌ها را برابر صفر قرار می‌دهیم. عملیات فوق را آنقدر تکرار می‌نمائیم تا موقعی که تمام سطرهای ماتریس L_D برابر صفر شوند. در این حالت کلیه نقاط شکست و یا رله‌هایی که باید تنظیم اولیه شده و بقیه رله‌ها براساس آنها هم‌آهنگ شوند مشخص شده‌اند. روش فوق را برای تعیین نقاط شکست در شبکه مورد مثال اجراء می‌نمائیم:

همان طور که قبلاً گفته شد با استفاده از بردارهای NRL و NRT یکی از نقاط شکست، یعنی رله ۱ برگزیده شد. رله ۱ در حلقه‌های C_1، C_5 و C_6 قرار دارد. این حلقه‌ها را کنار گذاشته و به عبارت دیگر کلیه سطرهای مربوط به این حلقه‌ها را در ماتریس L_D برابر صفر قرار می‌دهیم. ماتریس

L_{D1} =

L_{D1}	شماره رله‌ها													
حلقه‌ها و یا شبکه‌ها در دو جهت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
C_1		۱			۱						۱		۱	
C_2			۱		۱								۱	
C_3		۱								۱	۱			
$-C_1$							۱	۱					۱	
$-C_2$				۱		۱			۱			۱		
$-C_3$						۱				۱				
$-C_4$				۱			۱				۱			
$-C_5$							۱	۱		۱		۱		
$-C_6$				۱			۱	۱	۱			۱		

شکل ۶ـ ماتریس L_{D1}

L_D مطابق شکل ۶ تبدیل به ماتریس L_{D1} می‌گردد:

برای ماتریس جدید L_{D1} مجدداً بردارهای NRL و NRT را که آنها را NRL1 و NRT1 می‌نامیم به دست می‌آوریم:

NRL1 =

NRL1	حلقه‌های ناشناخته شبکه در دو جهت								
	C_1	C_2	C_3	$-C_1$	$-C_2$	$-C_3$	$-C_4$	$-C_5$	$-C_6$
تعداد رله‌های موجود در هر حلقه	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۵

NRT1 =

NRT1	شماره رله‌ها													
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
مجموع رله‌های هر حلقه	۰	۴	۶	۱۲	۴	۴	۱۲	۱۲	۱۲	۸	۴	۱۰	۱۰	۰

با روش قبل و با استفاده از بردارهای NRL1 و NRT1 رله ۶ به عنوان دومین نقطه شکست به دست می‌آید. رله ۶ در حلقه‌های C_2، C_3 و $-C_1$ است. این حلقه‌ها را از ماتریس L_{D1} حذف می‌نمائیم. ماتریس باقیمانده ماتریس L_{D2} نامیده می‌شود:

L_{D2} =

L_{D2}	شماره رله‌ها													
حلقه‌ها و یا شبکه‌ها در دو جهت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
C_1		۱								۱	۱			
$-C_1$				۱		۱			۱			۱		
$-C_2$						۱				۱		۱		
$-C_3$			۱	۱					۱					
$-C_4$							۱	۱		۱		۱		
$-C_5$				۱			۱	۱	۱			۱		
$-C_6$														

شکل ۷ـ ماتریس L_{D2}

مجدداً برای ماتریس L_{D2} بردارهای NRL2 و NRT2 را محاسبه می‌نمائیم:

NRL2 =

NRL2	حلقه‌های ناشناخته شبکه در دو جهت					
	C_1	$-C_1$	$-C_2$	$-C_3$	$-C_4$	$-C_5$
تعداد رله‌های موجود در هر حلقه	۳	۴	۴	۴	۴	۵

NRT2 =

NRT2	شماره رله‌ها													
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
مجموع رله‌های هر حلقه	۰	۳	۳	۱۲	۰	۳	۹	۹	۱۲	۸	۳	۱۰	۰	۰

با استفاده از بردارهای NRL2 و NRT2 حلقه C_4 را انتخاب نموده و در حلقه C_4 رله ۳ به‌عنوان یکی دیگر از نقاط شکست انتخاب می‌شود. رله ۳ در حلقه‌های C_4، $-C_3$ و $-C_5$ وجود داشته که این حلقه‌ها نیز از شبکه حذف می‌شوند. ماتریس

تلاقی حلقه با رله باقیمانده که با L_{D3} نمایش داده می‌شود مطابق شکل ۸ است:

L_{D3} =

L_{D3}		شماره رله‌ها													
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۱'	۳'	۴'	۵'	۶'	۲'	۳'
حلقه‌های	$-C_2$				۱		۱			۱			۱		
	$-C_4$			۱	۱					۱					
	$-C_6$				۱			۱	۱	۱			۱		

شکل ۸ـ ماتریس L_{D3}

برای ماتریس L_{D3} بردارهای NRL3 و NRT3 به صورت زیراند:

NRT3 =

NRT3	شماره رله‌ها														
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۱'	۲'	۳'	۴'	۵'	۶'	۲'
مجموع رله‌های هم حلقه	۰	۰	۳	۱۲	۰	۳	۵	۵	۱۲	۰	۰	۹	۰	۰

NRL3 =

NRL3	حلقه‌های باقیمانده شبکه در دو جهت		
	$-C_2$	$-C_4$	$-C_6$
تعداد رله‌های موجود در هر حلقه	۴	۳	۵

در اینجا نیز حلقه $-C_4$ انتخاب می‌شود و از بردار NRT3 رله ۴ به عنوان یکی دیگر از نقاط شکست به دست می‌آید. رله ۴ در حلقه‌های $-C_2$، $-C_4$ و $-C_6$ موجود بوده و لذا این حلقه‌ها هم حذف می‌شوند و تمام عناصر ماتریس L_D برابر صفر می‌گردند و بدین ترتیب کار یافتن نقاط شکست پایان می‌یابد. درنتیجه برای شبکه مورد مثال نقاط شکست رله‌های ۱، ۶، ۳' و ۴ خواهد بود. اگر تنظیم اولیه این ۴ رله تعیین شوند برمبنای آنها می‌توان تنظیم زمانی سایر رله‌ها را تعیین نمود. این چهار رله نقاط شروع برای هم‌آهنگی رله‌ها خواهند بود.

۴ـ بردار ترتیب هم‌آهنگی رله‌ها[1] (RSV)

با به دست آمدن نقاط شکست، تا این مرحله رله‌هایی را یافته‌ایم که از آنها باید تنظیم وهم‌آهنگی را شروع نمائیم. اما سئوالی که مطرح می‌شود این است که بعداز این رله‌ها، به ترتیب کدام رله‌ها را می‌توانیم تنظیم کنیم؟ جواب این سئوال در بردار ترتیب هم‌آهنگی رله‌ها نهفته است. به عبارت دیگر این بردار ترتیب تنظیم شدن رله‌ها را مشخص می‌کند. برای تعیین بردار ابتداء ماتریس تلاقی رله با شین و یا گره را تعریف نموده و سپس آن را تشکیل می‌دهیم.

۱ـ۴ـ ماتریس تلاقی رله‌ها با گره‌ها

این ماتریس را با R نام‌گذاری می‌نمائیم. عناصر R_{iJ} این ماتریس به این نحو تعیین می‌شوند که اگر رله Jام روی خط متصل به شین iام و نزدیک به شین باشد R_{iJ} برابر ۱+ خواهد بود. اگر رله Jام روی خط متصل به شین iام و دور از شین باشد R_{iJ} برابر ۱ـ خواهد بود و اگر رله Jام روی هیچکدام از خطوط متصل به شین iام نباشد R_{iJ} برابر صفر است. برای شبکه مورد مثال ماتریس R مطابق شکل ۹ است:

R		شماره رله‌ها													
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۱'	۲'	۳'	۴'	۵'	۶'	۲'
گره‌ها	۱	۱						۱	۱-						۱-
	۲	۱-	۱	۱			۱		۱	۱-	۱-			۱-	
	۳		۱-		۱-					۱		۱			
	۴			۱-	۱	۱					۱	۱-	۱-		
	۵					۱-	۱-	۱-					۱	۱	۱

شکل ۹ـ ماتریس تلاقی رله‌ها با گره‌ها

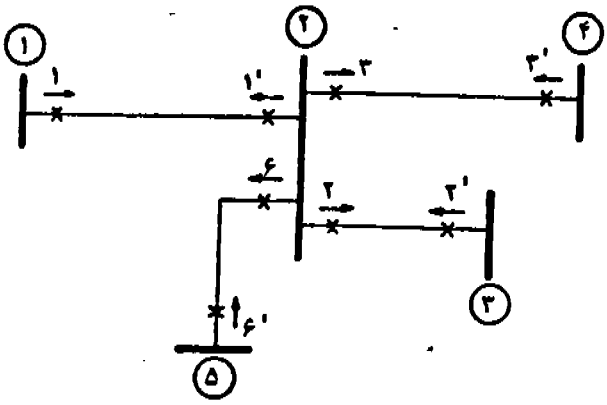
همان‌طور که ملاحظه می‌شود ماتریس تلاقی رله‌ها با گره‌ها را به سادگی می‌توان از روی ماتریس تلاقی شبکه نوشت. اگر ماتریس تلاقی شبکه یعنی ماتریس تلاقی خط‌ها با گره‌ها را با $\hat{A}$ نمایش دهیم، ماتریس R به صورت زیر خواهد بود:

R	شماره رله‌ها	
گره‌ها	$\hat{A}$	$-\hat{A}$

شکل ۱۰ـ ماتریس تفکیک شده تلاقی رله‌ها با گره‌ها

برای بیان چگونگی تشکیل بردار ترتیب هم‌آهنگی (RSV) قسمتی از شبکه قدرت نمونه را مطابق شکل ۱۱ درنظر می‌گیریم: در این شکل اگر رله ۱' را به عنوان رله اصلی فرض نمائیم، رله‌های ۶، ۳'، ۲' رله‌های پشتیبان آن خواهد بود. همچنین برای رله ۶ رله‌های ۱، ۳' و ۲' رله‌های پشتیبان می‌باشند. به طورکلی در تنظیم و هم‌آهنگی یک رله اول باید رله‌های اصلی آن تنظیم شوند و آنگاه خود آن رله تنظیم گردد. بردار

1. Relative Sequence Vector (RSV)



شکل ۱۱ـ قسمتی از یک شبکه قدرت

ترتیب هم‌آهنگی دارای همین خاصیت می‌باشد به طوری که همواره رله‌های اصلی هر رله، در ردیفهای قبل این بردار قرار دارند. و بنابراین برای تنظیم رله‌ها باید از اولین ردیف بردار RSV شروع نموده و به ترتیب رله‌ها را تنظیم نمائیم. رله‌هایی که با تعیین نقاط شکست به‌دست می‌آیند، رله‌هایی هستند که می‌توانند قبل از رله‌های دیگر تنظیم شوند این رله‌ها را دربردار RSV وارد می‌نمائیم و ستونهای وابسته به‌این رله‌ها را درماتریس تلاقی‌رله‌ها با گره‌ها حذف می‌کنیم. برای شبکه قدرت موردمثال، نقاط شکست، رله‌های ۱، ۳'، ۴ و ۶' بودند. ستونهای مربوط به این رله‌ها را در ماتریس تلاقی رله‌ها باگره‌های شبکه (شکل ۹) حذف می‌نمائیم و این چهار رله را وارد بردار RSV می‌کنیم. شکلهای ۱۱ و ۱۲ حاصل کار را نشان می‌دهد.

R_1		شماره رله‌ها									
		۲	۳	۵	۶	۴	۱	۳'	۴'	۵'	۲'
گره	۱					۱	-۱				-۱
	۲	۱	۱		۱		۱	-۱			
	۳	-۱						۱	۱		
	۴		-۱	۱					-۱	-۱	
	۵			-۱	-۱	-۱				۱	۱

شکل ۱۱ـ الف ـ ماتریس تلاقی گره‌ها با رله‌ها پس از حذف نقاط شکست

RSV_1	۱	۳'	۴	۶'										

شکل ۱۲ـ بردار ترتیب هم‌آهنگی (RSV)

حال سطرهای ماتریس R_1 را بررسی می‌نمائیم و دنبال سطرهایی می‌گردیم که یا تمام عناصر آن صفر و ۱- باشد و یا تمام عناصر آن بجز یک عنصر صفر و ۱- بوده و یک عنصر ۱+ باشد. در حالت اول کلیه رله‌های متناظر با عناصر ۱- را می‌توان تنظیم نمود. لذا این رله‌ها را وارد بردار RSV نموده و ستونهای متناظر با آنها را در ماتریس R حذف می‌نمائیم. مثلاً در شکل ۱۱ فرض کنیم تمام عناصر مربوط به گره ۲ برابر ۱- باشند این نشان می‌دهد که رله‌های ۱'، ۳، ۲، ۶ قبلاً تنظیم شده‌اند و درماتریس R_1 وجودندارند و لذا می‌توان رله‌های ۱، ۳'، ۲، ۶' را که تمام رله‌های اصلی آنها قبلاً تنظیم شده است، تنظیم نمود. عناصر متناظر با این رله‌ها، همه ۱- خواهند بود.

در حالت دوم که در یک سطر فقط یکی از عناصر ۱+ بوده و بقیه یا صفر و یا ۱- می‌باشند، فقط یک رله وجود دارد که رله‌های اصلی آن تنظیم شده‌اند و آن رله‌ایست که در طرف مقابل رله متناظر با عنصر ۱+ قرار گرفته است. مثلاً در شکل ۱۱ فرض کنید برای گره ۲ فقط یک عنصر ۱+ وجود داشته و آن هم متناظر با رله ۱' باشد. این امر نشان دهنده این است که رله‌های ۳، ۲ و ۶ قبلاً تنظیم شده و از ماتریس تلاقی رله‌ها با گره‌ها حذف شده‌اند و فقط رله ۱' تنظیم نشده و درماتریس وجود دارد. از روی شکل می‌بینیم که در این حالت فقط رله ۱' که رله مقابل رله ۱ می‌باشد قابل تنظیم است، زیرا قبلاً رله‌های اصلی آن یعنی ۲، ۳ و ۶ تنظیم شده‌اند. با بررسی سطرهای ماتریس R_1 مربوط به شبکه قدرت نمونه ملاحظه می‌شود که در سطرهای ۱ و ۴ هر کدام فقط یک عدد ۱+ وجود دارد. در سطر اول عدد ۱+ متناظر با رله ۷ می‌باشد و رله مقابل آن رله ۷' است. همچنین در سطر چهارم عدد ۱+ متناظر با رله ۵ بوده و رله مقابل ۵ رله ۵' است. بنابراین رله‌های ۷' و ۵' را وارد ماتریس RSV بوده و ستونهای متناظر با آنها را از ماتریس R_1 حذف می‌نمائیم. نتیجه به صورت ماتریس‌های R_2 و RSV_2 خواهد شد (شکلهای ۱۳ و ۱۴).

R_2		شماره رله‌ها							
		۲	۳	۵	۶	۴	۱	۳'	۴'
گره	۱					۱	-۱		
	۲	۱	۱		۱		۱	-۱	
	۳	-۱						۱	۱
	۴		-۱	۱					-۱
	۵			-۱	-۱	-۱			

شکل ۱۳ـ ماتریس تلاقی رله‌ها با گره‌ها (R_2)

RSV_2	۱	۳'	۴	۶'	۵'	۲'								

شکل ۱۴ـ بردار RSV_2

مجدداً سطرهای R_2 را بررسی می‌نمائیم . در سطر ۵ تمام عناصر برابر ۱- می‌باشند رله‌های متناظر با این عناصر ۵ و ۶ و ۷ بوده که آنها را وارد ماتریس RSV نموده و ستونهای متناظر با این رله‌ها را ازماتریس R_2 حذف می‌نمائیم . نتیجه به صورت ماتریس R_3 و بردار RSV_3 خواهد بود :

R_3		شماره رله‌ها				
		۲	۳	۴	۴'	۳'
i	۱			-۱		
	۲	۱	۱	۱	-۱	
	۳	-۱			۱	۱
	۴		-۱			-۱
	۵					

شکل ۱۵- ماتریس R_3

RSV_3	۱	۳'	۲	۴'	۵'	۳'	۵	۶	۷					

شکل ۱۶- بردار RSV_3

اگر باز به ماتریس R_3 مراجعه نمائیم ، مشاهده می‌شودکه در سطرهای ۱ و ۴ همه عناصر ۱- می‌باشند بنابراین رله‌های ۱' و ۳ و ۴' نیز وارد بردار RSV می‌گردند نتیجه به صورت ماتریس R_4 و بردار RSV ظاهر خواهد شد :

R_4		شماره رله‌ها	
		۲	۲'
i	۱		
	۲	۱	-۱
	۳	-۱	۱
	۴		
	۵		

شکل ۱۷- ماتریس R_4

RSV_4	۱	۳'	۲	۴'	۵'	۳'	۵	۶	۷	۲'	۴'	۱'		

شکل ۱۸- ماتریس RSV_4

در ماتریس R_4 در سطرهای ۲ و ۳ هرکدام فقط یک ۱+ وجود دارد . از اینجا نیز رله‌های ۲ و ۲ وارد بردار RSV می‌شوندو تمام عناصر ماتریس R_4 برابر صفر می‌شوند و بردار نهائی RSV به شکل زیر درمی‌آید :

RSV	۱	۳'	۲	۴'	۵'	۳'	۵	۶	۷	۲'	۲	۱'	۲	۲'

شکل ۱۹- بردار نهائی RSV

۵- ماتریس رله‌های اصلی و پشتیبان (BPM)

از بردار ترتیب‌تنظیم رله‌ها یعنی RSV مشخص‌می‌شود که چه رله‌ای باید قبل از رله و یا رله‌های دیگر تنظیم‌گردد . و اما بعداز اینکه از بردارRSV مشخص گردید که یک رله را می‌توان تنظیم‌نمود باید بدانیم‌که رله‌های اصلی آن کدامند تا با درنظر گرفتن مشخصه‌ها و تنظیمهای آنان ،رله‌موردنظر را تنظیم نمائیم . برای تعیین رله‌های اصلی هر رله از ماتریس تلاقی رله‌ها با گره‌ها (شکل ۹) استفاده‌می‌نمائیم. می‌دانیم که‌هر رله دارای یک گره نزدیک و یک گره‌دوراست . در ماتریس R و در ستون متناظر با هر رله ، مقابل شین نزدیک ۱+ و مقابل شین دور ۱- وجود دارد . تمام رله‌های اصلی هر رله در گروه دور آن قرار دارند . از ماتریس R ، گره دور هر رله را می‌توان پیدا کرد .برای این کار در ستون متناظر با هر رله عدد ۱-را پیدا می‌نمائیم ، گره مربوط به این عدد ، گره دور رله است . کلیه رله‌های نزدیک این گره به استثنای رله‌ای‌که با رله مورد نظر روی یک‌خط قراردارند ، رله‌های اصلی مورد جستجو می‌باشند . به عنوان مثال فرض کنید در ماتریس R (شکل ۹) می‌خواهیم رله‌های اصلی رله ۳ را پیدا نمائیم . در ستون متناظر با رله ۳ عدد ۱- را پیدا می‌نمائیم . عدد ۱- در مقابل گره ۴ قرار دارد . بنابر این گره ۴ ، گره دور رله ۳ است . رله‌های نزدیک این گره ، رله‌های ۴ و ۵ و ۳' می‌باشند . رله ۳' ، رله مقابل رله ۳ است پس بجز این رله بقیه رله‌ها یعنی ۴ و ۵ رله‌های اصلی رله۳ می‌باشند . به همین ترتیب برای بقیه رله‌ها عمل می‌نمائیم . نتیجه را می‌توان در یک ماتریسی مطابق شکل ۲۰ به نام ماتریس BPM جای داد .

BPM	رله‌های مورد نظر													
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۱'	۲'	۳'	۴'	۵'	۶'	۷'
رله‌های اصلی	۲	۴	۴	۴'	۶'	۵'	۵'	۷	۴	۲	۵	۲	۲	۱
	۳		۵		۷'	۷'	۶'		۶	۶	۳'	۳'	۳	
	۶								۱'	۱			۱'	

شکل ۲۰- ماتریس رله‌های اصلی و پشتیبان (BPM)

همان‌طور که ملاحظه می‌شود ماتریس BPM ماتریسی است که تعداد ستونهای آن برابر تعداد رله‌ها و تعداد سطرهای آن یکی کمتر از بیشترین تعداد خطوطی‌است‌که به یک گره متصل است .

۶- نتیجه

در این مقاله چگونگی تعیین ماتریس ترتیب هم‌آهنگی

و ماتریس رله‌های اصلی و پشتیبان بیان گردید و برای یک شبکه نمونه اجرا شد. به‌طورکلی روش کار به‌ترتیب‌زیر است.

۱ـ ماتریس تلاقی رله‌ها با حلقه‌ها L_D را طبق رابطه (۱) تشکیل می‌دهیم.

۲ـ با استفاده از ماتریس L_D بردارهای NRL و NRT وغیره را محاسبه و از آنجا نقاط شکست شبکه را به دست می‌آوریم

۳ـ ماتریس تلاقی رله‌ها با گره‌ها را طبق شکل ۱۰ تشکیل می‌دهیم. با استفاده از این ماتریس و نقاط شکستی‌که قبلا" محاسبه شده‌اند بردار ترتیب هم‌آهنگی (RSV) محاسبه می‌نمائیم.

۴ـ همچنین با استفاده از ماتریس تلاقی رله‌ها با گره‌ها ماتریس رله‌های اصلی و پشتیبان را می‌توان محاسبه نمود.

۷ـ مراجع

1- G.E. Radke, "A Method for Calculating time- Overcurrent Relay Settings by Digital Computer" , IEEE Transactions on PAS , Special Supplement, Vol. 282, 1963, pp . 189-305.

2- H.Y. Tsien , " An Automated Digital Computer Program for Setting transmission Line Directional Overcurrent Relays",IEEE Transactions on PAS, October 1964, pp. 1048-1053.

3- R. Zinering and R.Allen,"Computerization of A Large Relay Setting File", IEEE Transactions on Power Delivery Vol. PWRD-1 , January 1986, pp. 135-142.

4- M. J. Dambpru and S.S. Venkata , Specification of Computer Aided design of Transmission Protection system , Final Report E1-3337 , RP 1767-6, EPRI January 1984.

5- M. J. Dambory, R. Ramaswami , S.S. Venkata and J.M. Postforoosh,"Applications of Computer Aids to Transmission Protection Engineering" , Proceedings of the Ninth Western Protective Relay Conference,Spokane WA, October 26-28, 1982.

6- M.J. Dambory,R. Ramaswami , S.S. venkata and J.M. Postforoosh , "Computer Aided Transmission Protection System Design, Part L: Algorithms", IEEE Transactions on PAS , Vol. PAS-103, January 1984,pp.51-59.

7- R. Ramaswami,S.S. Venkata,J.Dambory and J.M. Postforoosh, " Computer Aided Transmission Protection system design, Part II: Implementation and Results",IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-103, January 1984, pp. 60-65.

8- R.Ramaswami, M.J. Dambory , S.S. Venkata, A. K. Jampala and J. M. Postforoosh, "Enhanced Algorithms for Transmission Protective Relay Coordination" IEEE Transactions on Power Delivery Vol. PWRD-1, January 1986, pp.280-287.

9- M.J. Dambory, R. Ramaswami , A.K. Jampala and S.S. Venkata, "Application of Relational Database to Computer-Aided-Engineering of Transmission Protection Systems", Proceedings of IEEE PICA Conference San Francisco, May 1985, pp. 54-60.