

مدل سازی مدارهای الکتریکی توسط شبکه های پتری با استفاده از کمان های کنترلی افزوده شده

عباس دیدبان^{۱*}، مقداد صبوری راد^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: شبکه های پتری پیوسته، مدل سازی، مدارهای الکتریکی، کمان کنترلی.</p>	<p>شبکه های پتری پیوسته با عناصر موجود در آن برای مدل سازی سیستم هایی که بر پایه تغییر شار یک متغیر می باشند کارایی دارند بنابراین تغییرات شار هر متغیری مانند جریان، آب، توان و ... را می توان به وسیله شبکه های پتری پیوسته مدل نمود، اما شبکه های پتری با عناصر موجود در آن پاسخگوی مدل سازی سیستم هایی که بر پایه تغییر دو یا چند متغیر می باشند (مانند مدارهای الکتریکی) نمی باشد. در این مقاله با ارائه ابزارهایی، یک روش جدید بر پایه شبکه های پتری پیوسته برای مدل کردن و تحلیل مدارهای الکتریکی بیان شده است. در ارائه این روش جدید برای مدل سازی، نوع جدیدی از کمان ها با نام کمان کنترلی که به وسیله آن سرعت گذرگاه های شبکه پتری کنترل می شود، ارائه شده است. با اضافه کردن این کمان ها، امکان مدل سازی سیستم های خطی در حالت کلی فراهم می شود.</p>

۱- مقدمه

می باشد که دارای قابلیت گرافیکی است. قابل اجرا بودن آن به شبکه های پتری این امکان را می دهد که بتواند وضعیت های مختلف یک سیستم را از طریق اجرای مدل سازی و تحلیل آن برای سیستم مورد نظر به دست آورد. با توجه به قابلیت های فوق، استفاده از مدل سازی پتری کاربرد وسیعی در کارهای صنعتی پیدا کرده و مطالعات زیادی بر روی آن صورت گرفته است [۱-۴]. از معایب این ابزار می توان به عدم توانمندی آن برای مدل سازی تمام سیستم ها، در حال حاضر اشاره کرد. یکی دیگر از ابزارهای مدل سازی گرافیکی، باندگراف می باشد، که ابزاری عمومی برای مدل سازی هر نوع پدیده فیزیکی است و محدود به نوع خاصی از پدیده ها نیست اما از دیدگاه باندگراف تمام سیستم های فیزیکی شبیه هم هستند و باندگراف هیچ تفاوتی بین سیستم ها قائل

برای معرفی و شناخت یک سیستم لازم است تا رفتار آن سیستم به طریقی معرفی شود. روش معمول برای این کار مدل سازی سیستم با توابع ریاضی می باشد. اگر چه این روش برای سیستم های خطی ساده و نسبتاً گویا است ولی برای سیستم های غیرخطی و یا خطی مرتبه بالا، از روی توابع نمی توان به راحتی رفتار سیستم را پیش بینی نموده و تغییرات خروجی ها را ملاحظه نمود. در این گونه مواقع ابزار گرافیکی که بتواند رفتار سیستم را مدل کرده و تغییرات خروجی را نشان دهد، می تواند ابزاری سودمند باشد. شبکه های پتری یک زبان مدل سازی قابل اجرا

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: adideban@semnan.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

مشخص می‌شود که از لحاظ عملکردی مانند شبکه‌های پتری زمان‌دار^۴ عمل می‌کند، با این مزیت که حجم مدل ارائه شده را به شدت کاهش می‌دهد، پس با توجه به موارد فوق می‌توان نتیجه گرفت که در سال‌های اخیر برای مدل‌سازی سیستم‌های گوناگون نیاز به تعریف المان‌های جدید برای شبکه‌های پتری کاملاً احساس شده است.

تا به امروز مدل‌سازی‌هایی که بر پایه شبکه‌های پتری انجام شده است بر پایه تغییر شار یک متغیر استوار بوده است. به عنوان مثال المان‌های الکتریکی مانند سلف و خازن را به صورت مجزا می‌توان با شبکه‌های پتری مدل کرد در حالی که وقتی این المان‌های الکتریکی به صورت یک مدار الکتریکی در کنار هم قرار بگیرند مدل‌سازی آن پیچیده خواهد شد زیرا در تعیین پارامترهای مدار گاهی ولتاژ و گاهی جریان عامل تعیین کننده می‌باشد. در نتیجه باید در مدل ارائه شده برای مدار الکتریکی امکان تبدیل شار جریان به ولتاژ و برعکس وجود داشته باشد. بنابراین در مدارهای الکتریکی با تغییر دو متغیر روبرو هستیم. حال آن‌که اگر سیستم ما مانند مدارهای الکتریکی بر پایه تغییر شار دو یا چند متغیر باشد، ابزارهای شبکه پتری برای مدل‌سازی آن کافی نمی‌باشد. در این مقاله با اضافه کردن المانی به نام کمان کنترلی، این امکان برای شبکه‌های پتری فراهم شده است که بتوان توسط آن اکثر سیستم‌های موجود را مانند مدارهای الکتریکی که دارای تغییر شار دو یا چند متغیر می‌باشند، مدل‌سازی نمود.

ادامه مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است، در قسمت دوم شبکه‌های پتری گسسته، پیوسته، هیبرید، و در انتها پارامتر جدید اضافه شده معرفی شده است، در قسمت سوم مدل المان‌های مدار به صورت جداگانه بیان شده است، در قسمت چهارم مدل‌سازی چند مدار با بیش از یک المان بررسی می‌شود و در قسمت پنجم مدل‌سازی

نمی‌باشد. به عنوان مثال در مرجع [۵] برای مدل‌سازی برخی از مدارهای سوئیچینگ شبکه‌های قدرت از بانداگراف استفاده شده است.

از شبکه‌های پتری پیوسته می‌توان برای مدل‌سازی شبکه آب یا مواد سیال استفاده نمود به عنوان نمونه در مرجع [۶] از شبکه‌های پتری برای نشان دادن مدل‌سازی و آنالیز مخازن آب استفاده شده است زیرا شبکه‌های پتری با توجه به شکل گرافیکی آن و شباهت‌هایی که با فلوچارت دارند برای نشان دادن وضعیت مخازن و سرعت شار سیال بسیار مناسب می‌باشد. اما با توجه به گسترش شبکه‌های پتری در زمینه‌های مختلف و خصوصیات متفاوت سیستم‌ها، نیاز به اضافه کردن المان‌هایی جدید با خواص متفاوت برای سادگی در مدل ارائه شده به شبکه‌های پتری احساس شده است، به عنوان مثال محققان برای مدل‌سازی سیستم‌های قدرت مانند توربین‌های بادی یا ژنراتورهای دیزلی به وسیله شبکه‌های پتری رنگی، نوعی کمان پتری جدید به نام کمان پایگاه داده^۱ معرفی کرده‌اند. این کمان طوری تعریف شده است که ورودی آن تنها یک مکان^۲ بوده و وزن این کمان را بعد ماتریس ورودی مشخص می‌کند و عملکرد این کمان به گونه‌ای است که وزن کمان پایگاه داده مشخص کننده تعداد رنگ‌های نشانه‌های مکان ورودی است [۷]. در مرجع [۸] برای مدل‌سازی سیستم‌های هیبرید متغیر با زمان از نوع جدیدی از شبکه‌های پتری به نام شبکه‌های پتری دیفرانسیلی^۳ استفاده کرده‌اند که برای این منظور دو نوع جدید از مکان‌ها و گذرگاه‌ها به نام کمان‌ها و گذرگاه‌های دیفرانسیلی معرفی شده است که معادلات دیفرانسیل را به وسیله آن‌ها نمایش می‌دهند. در این نوع از شبکه‌های پتری وزن کمان‌های پتری دیفرانسیلی به صورت ماتریس است. در نتیجه رابطه مشخص کننده نشانه‌ها در مکان دیفرانسیلی متصل به این کمان با توجه به درجه ماتریس

¹ database

² Place

³ Differential Petri Nets

⁴ Time Petri Nets

آتش شدن گذرگاه آنی نبوده بلکه با سرعت $V(t)$ انجام می شود. باتوجه به تعاریف بالا نشانه‌گذاری شبکه پتری پیوسته بعد از مدت زمان dt به صورت رابطه (۱) می باشد.

$$m(t+dt) = m(t) + W \cdot V(t) \cdot dt \quad (1)$$

که در این رابطه W ماتریس تلاقی است و به این صورت تعریف می شود:

$$W = \sum \text{Post}(P_i, T_j) - \sum \text{Pre}(P_i, T_j) \quad (2)$$

$V(t)$ ماتریس مشخص کننده حداکثر سرعت گذرگاه‌ها می باشد.

فرق بین شبکه‌های پتری پیوسته و گسسته در سرعت گذرگاه‌ها می باشد به جای حاصل ضرب سرعت گذرگاه $V(t)$ در زمان dt ، بردار گذرگاه‌ها آتش شده در این بازه زمانی را خواهیم داشت. تعداد نشانه‌های موجود در مکان‌های شبکه‌های پتری گسسته به صورت یک عدد طبیعی می باشد به عبارتی مقداری گسسته است حال آن که تعداد نشانه‌ها و سرعت گذرگاه‌ها در شبکه‌های پتری پیوسته بعد از گذشت یک واحد زمانی، مقداری حقیقی می باشد. به تلفیقی از شبکه‌های پتری گسسته و پیوسته شبکه‌های پتری هیبرید می گویند [۹].

۲-۱- کمان کنترلی

کمان‌ها، المان‌هایی جهت دار هستند که گذرگاه‌ها را به مکان و مکان‌ها را به گذرگاه‌ها متصل می کنند. در مکان‌های معمولی وقتی گذرگاهی آتش می شود از تمام مکان‌هایی که توسط کمان‌ها به گذرگاه متصل است به اندازه سرعت آن گذرگاه نشانه کم می شود. به عبارتی کمان‌های معمولی نشانه‌ها را از مکان‌های قبل از گذرگاه به مکان‌های بعد آن گذرگاه انتقال می دهد. درحالی که کمان کنترلی خاصیت انتقال نشانه‌ها را ندارد و فقط برای کنترل سرعت یک گذرگاه مورد استفاده قرار می گیرد و

مدار RLC موازی و نتایج شبیه‌سازی آن بیان شده است و در قسمت آخر نتیجه‌گیری مقاله عنوان شده است.

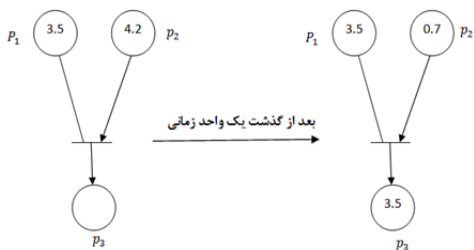
۲- شبکه‌های پتری

یک گراف شبکه پتری از چهار عنصر مکان (O)، گذرگاه (|)، و کمان (\rightarrow) و نشانه (●) تشکیل شده است. شبکه‌های پتری گسسته یک ساختار ۵ عنصری $C = \{P, T, PrePost, m_0\}$ می باشد که $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ مجموعه مکان‌های شبکه پتری است که مقدار آن محدود و مخالف صفر است. $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ مجموعه گذرگاه‌های شبکه پتری است و مقدار آن نیز محدود و مخالف صفر می باشد. $Pre(P_i, T_j)$ وزن کمان‌های مرتبط کننده مکان P_i به گذرگاه T_j می باشد، $Post(P_i, T_j)$ وزن کمان‌های مرتبط کننده گذرگاه T_j به مکان‌های P_i می باشد، به عبارتی یک نگاشت از گذرگاه‌ها به مجموع مکان‌ها است و m_0 نشانه‌گذاری اولیه شبکه پتری گسسته می باشد.

مکان‌ها، ارائه کننده وضعیت یک سیستم هستند مانند حافظه و گذرگاه‌ها نشان دهنده یک پیش آمد مانند سوئیچ می باشند. پس از این که نشانه‌ها تعریف شدند و در مکان‌های شبکه پتری قرار گرفتند، تعداد وضعیت نشانه‌ها در حین اجرای شبکه پتری می تواند تغییر کند. به عبارت دیگر می توان گفت نشانه‌ها مورد استفاده قرار می گیرند تا بتوانند اجرای شبکه پتری را تعریف کنند.

شبکه پتری، به وسیله شلیک گذرها اجرا می شود. اجرای یک شبکه به وسیله تعدادی نشانه‌های مجزای شماره گذاری شده انجام می شود.

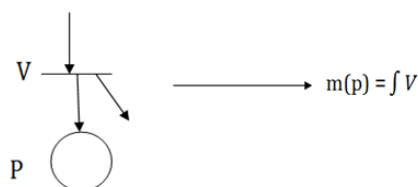
گذرگاه t به وسیله برداشتن نشانه از مکان‌های ورودی و ایجاد نشانه‌های جدید مجزا در مکان‌های خروجی عمل می کند. یک گذرگاه در صورتی شلیک می کند که مجاز یا فعال باشد و در صورتی مجاز است که هر کدام از مکان‌های ورودی گذرگاه حداقل دارای تعداد نشانه‌ای برابر با کمان‌های ورودی به آن گذر (که به صورت پیکان از مکان p به گذر t است) باشد. در شبکه‌های پتری پیوسته،



شکل ۲- نحوه عملکرد کمان کنترلی در شبکه‌های پتری

۳- مدل المان‌های الکتریکی

در شبکه‌های پتری پیوسته مقدار نشانه‌های موجود در مکان P برابر با انتگرال سرعت گذرگاه قبل از آن است.



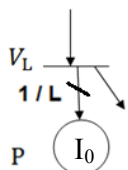
شکل ۳- تعریف ریاضی شبکه پتری

برای مدل کردن المان‌های مدارهای الکتریکی بهتر است روابط موجود در آن را به صورت انتگرالی درآورده سپس آن را مدل نماییم.

در سلف روابط زیر را داریم:

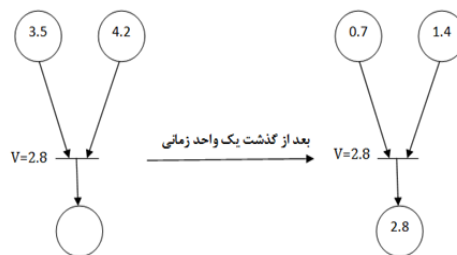
$$V(t) = L \frac{di(t)}{dt} \rightarrow I_L = I_0 + 1/L \int V_L(t) dt \quad (3)$$

در نتیجه رابطه ولتاژ و جریان سلف را می‌توان مطابق شکل ۴ نمایش داد. تعداد نشانه‌های موجود در مکان P مشخص‌کننده جریان عبوری از سلف (I_L) می‌باشد.



شکل ۴- مدل پتری سلف

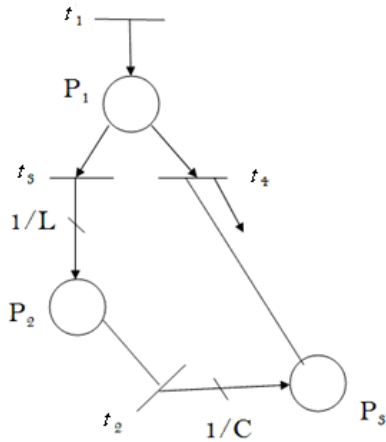
هیچ تغییری در نشانه‌های مکان متصل به این کمان به وجود نمی‌آورند. از دیگر خواص کمان کنترلی جهت آن می‌باشد که همواره از مکان به سمت گذرگاه است. نقش این کمان‌ها شبیه کمان‌های فعال‌کننده^۱ و غیرفعال‌کننده^۲ در شبکه‌های پتری گسسته می‌باشد. به عنوان مثال اگر کمان معمولی در شبکه پتری داشته باشیم بعد از آتش شدن گذرگاه t تغییراتی مطابق شکل ۱ خواهیم داشت.



شکل ۱- نحوه عملکرد کمان‌ها در شبکه‌های پتری

وقتی از کمان معمولی استفاده می‌کنیم، سرعت گذرگاه ثابت می‌ماند. در مثال فوق حداکثر سرعت گذرگاه برابر $2/8$ است و با توجه به این که تعداد نشانه‌های مکان‌های متصل به این گذرگاه بیشتر از $2/8$ است، در نتیجه سرعت موثر برابر با سرعت حداکثر گذرگاه یعنی $2/8$ می‌باشد. پس $2/8$ نشانه از مکان‌های ماقبل این گذرگاه کاسته شده و همین تعداد نشانه به مکان بعد از گذرگاه افزوده می‌شود. اما اگر در همین مثال از یک کمان کنترلی استفاده کنیم تغییرات به صورت زیر خواهد بود. در شبکه پتری شکل ۲ ابتدا سرعت گذرگاه با توجه به تعداد نشانه‌های موجود در مکان p_1 مشخص می‌شود در نتیجه سرعت گذرگاه برابر $3/5$ می‌شود، سپس از کمان معمولی انتقال نشانه انجام می‌شود و هیچ نشانه‌ای از مکانی که به وسیله کمان کنترلی به گذرگاه متصل است کاسته نمی‌شود. نتیجه بعد از گذشت یک واحد زمانی در شکل ۲ نشان داده شده است.

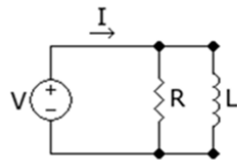
¹ Incidentor
² inhibitor



شکل ۸- مدل سازی مدار LC سری با استفاده از شبکه های پتری

همان طور که در شماتیک مدار در شکل ۷ مشخص است منبع ولتاژ مدار LC بین ولتاژ دو سر خازن و دو سر سلف تقسیم می شود، با استفاده از ولتاژ سلف (همان طور که در بخش قبل در مدل پتری سلف نشان داده شد) می توان جریان عبوری از سلف را به دست آورد. که با توجه به سری بودن خازن و سلف، جریان عبوری از سلف با جریان عبوری از خازن برابر می باشد. در مرحله بعد ابتدا سرعت گذرگاه t_2 را توسط مکان P_2 کنترل می کنیم. در نتیجه سرعت گذرگاه t_2 برابر با جریان عبوری از خازن (I_C) می شود، حال با استفاده از I_C (باتوجه به بخش قبل در مدل پتری خازن) می توان ولتاژ دو سر خازن را در مدل پتری محاسبه نمود، در نتیجه سرعت گذرگاه t_4 که مشخص کننده ولتاژ دو سر خازن می باشد توسط مکان P_3 کنترل می شود.

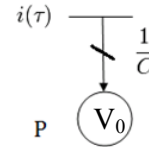
به عنوان مثال دیگر، مدار RL موازی را بررسی می کنیم، که مدل پتری آن در شکل ۱۰ آمده است.



شکل ۹- شماتیک مدار RL موازی

به همین صورت مدل خازن با توجه به روابط آن به صورت شکل ۵ خواهد بود.

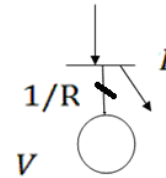
$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} \longrightarrow v(t) = V_0 + 1/C \int i(t) dt \quad (4)$$



شکل ۵- مدل پتری خازن

در مدل فوق تعداد نشانه های موجود در مکان P نشان دهنده ولتاژ دو سر خازن (V_C) می باشد. مقاومت نیز به وسیله کمان کنترلی مدل می شود.

$$V = RI$$

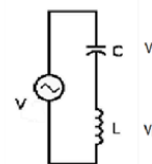


شکل ۶- مدل پتری مقاومت

که در مدل فوق سرعت گذرگاه برابر با جریان عبوری از مقاومت می باشد.

۴- مدل سازی مدارهای دو المانی

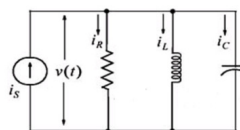
در قسمت قبل به بررسی مدل پتری تک تک المان های مدارهای الکتریکی پرداختیم، در این بخش به مدل سازی مدارهای الکتریکی با بیش از یک المان می پردازیم. به طور مثال ابتدا مدار LC سری را که مدل پتری آن به صورت شکل ۸ می باشد مورد بررسی قرار می دهیم.



شکل ۷- شماتیک مدار LC سری

همان‌طور که در شماتیک مدار RLC در شکل ۱۱ مشخص می‌شود، منبع جریان I_S بین جریان‌های مقاومت و خازن و سلف تقسیم می‌شود ($I_S = I_R + I_C + I_L$). در مدل پتری مدار RLC موازی نیز می‌بینیم که سرعت گذرگاه t_1 (I_S) بین گذرگاه‌های t_2 ، t_3 و t_4 که نمایش‌دهنده جریان خازن و سلف و مقاومت است تقسیم شده است، در این مدل ابتدا با استفاده از سرعت گذرگاه t_2 که نشان‌دهنده جریان خازن (I_C) می‌باشد ولتاژ دو سر خازن (V_C) به دست می‌آید. باتوجه به موازی بودن مدار داریم:

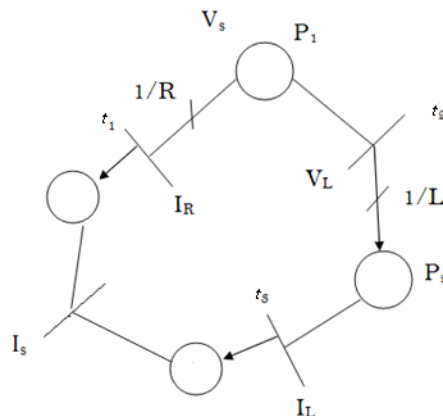
$$V_C = V_L = V_R$$



شکل ۱۱- شماتیک مدار RLC موازی

در بخش دوم دیدیم که با معلوم بودن ولتاژ دو سر سلف می‌توان جریان عبوری از سلف را به دست آورد. بنابراین توسط کمان کنترلی سرعت گذرگاه t_3 را با نشانه‌های موجود در مکان P_2 کنترل می‌کنیم در نتیجه سرعت این گذرگاه برابر با V_L خواهد شد. حال با استفاده از مدل پتری سلف، جریان عبوری از سلف را به دست می‌آوریم (تعداد نشانه‌های موجود در مکان P_3 مشخص‌کننده جریان عبوری از سلف است.) سپس با استفاده از کمان کنترلی سرعت گذرگاه t_3 را با تعداد نشانه‌های مکان P_3 کنترل می‌کنیم. بنابراین سرعت این گذرگاه برابر با جریان سلف (I_L) خواهد شد. همین‌طور باتوجه به این‌که $V_C = V_R$ می‌توان جریان عبوری از مقاومت R را با یک کمان کنترلی با ضریب $1/R$ مشخص نمود که این مقدار با سرعت گذرگاه t_4 کنترل می‌شود. مکان P_1 بیانگر گره اصلی مدار بوده که مجموع جریان‌های ورودی و خروجی آن صفر می‌باشد.

وجود این کمان‌های کنترلی در ماتریس تلاقی هیچ تاثیری ندارد، بلکه در ماتریس $V(t)$ تاثیر گذار می‌باشد، پس ماتریس تلاقی ما به صورت زیر می‌باشد.



شکل ۱۰- مدل‌سازی مدار RL موازی با استفاده از شبکه‌های پتری

در مدل فوق منبع ولتاژ توسط مکان P_1 مدل شده است. باتوجه به موازی بودن مقاومت و سلف، ولتاژ دو سر مقاومت و سلف با ولتاژ منبع برابر است. باتوجه به رابطه $V = RI$ ، اگر سرعت گذرگاه t_1 را توسط تعداد نشانه‌های مکان P_1 با ضریب $1/R$ کنترل نماییم سرعت این گذرگاه برابر با جریان عبوری از مقاومت خواهد شد. همان‌طور که در بخش قبل دیدیم با استفاده از ولتاژ دو سر سلف و مدل پتری می‌توان جریان سلف را به دست آورد. بنابراین ابتدا توسط کمان کنترلی، سرعت گذرگاه t_2 را برابر با ولتاژ سلف می‌کنیم (باتوجه به موازی بودن مدار، ولتاژ سلف و ولتاژ منبع برابرست.) سپس توسط مدل پتری سلف، جریان سلف را به دست می‌آوریم. (تعداد نشانه‌های مکان P_2 مشخص‌کننده جریان سلف می‌باشد.) حال با استفاده از کمان کنترلی سرعت گذرگاه t_3 را کنترل می‌کنیم. در نتیجه سرعت این گذرگاه جریان سلف (I_L) را نشان می‌دهد.

۵- مدل‌سازی مدار RLC موازی

باتوجه به مطالب قسمت سوم، مدل به دست آمده برای مدار RLC موازی به صورت شکل ۱۲ می‌باشد.

در حال حاضر تمام پارامترهای رابطه (۱) موجود می‌باشد و می‌توان در هر لحظه تعداد نشانه‌های هر مکان و در نتیجه پارامترهای مدار را محاسبه نمود.

طبق رابطه (۱) داشتیم:

$$m(t+dt) = m(t) + W \cdot V(t) \cdot dt$$

همان‌طور که در ماتریس $V(t)$ مشاهده می‌شود سرعت بعضی از گذرگاه‌ها تنها وابسته به یک مکان نیست و رابطه جبری از مکان‌های مختلف است، بنابراین ماتریس $V(t)$ را به صورت زیر می‌توان تغییر داد:

$$V(t) = W_I (W_V \cdot m_0 + I_S) \quad (۵)$$

که ماتریس W_V مشخص‌کننده ماتریس تلاقی مکان‌های کنترلی است. در این ماتریس سرعت گذرگاه‌هایی که به بیش از یک مکان وابسته است صفر در نظر گرفته شده است. W_I ماتریس تلاقی گذرگاه‌هایی می‌باشد که به بیش از یک مکان وابسته می‌باشند.

با در نظر گرفتن $I_S = 10$ و $R = 1\Omega$, $C = 5F$, $L = .5H$ و ولتاژ اولیه خازن صفر و جریان اولیه سلف ۵، معادله حالت مدار RLC به صورت زیر خواهد شد:

$$5V_C'' + V_C' + 2V_C = 0$$

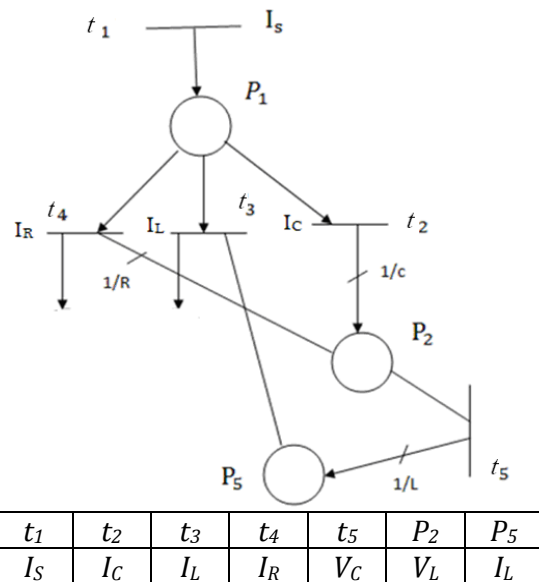
حال با مقایسه نتایج مدل‌سازی مدار RLC با استفاده از شبکه‌های پتری و معادله حالت با استفاده از نرم‌افزار MATLAB با بهره‌گیری از دو مقدار dt متفاوت نتایج حاصل می‌شود.

همان‌طور که در اشکال ۱۳ و ۱۴ مشاهده می‌شود با کوچک‌تر شدن مقدار dt ، باتوجه به نزدیک شدن نقاط، میزان درصد خطا کاهش می‌یابد. پس اگر مقدار dt کوچک در نظر گرفته شود، تحلیل و آنالیز مدار با استفاده از شبکه‌های پتری در واقع همان خروجی‌هایی است که از معادلات حالت حاصل می‌شود، بنابراین با مقایسه‌ی این نتایج می‌توان از تحلیل مدار به وسیله‌ی شبکه‌های پتری مطمئن بود.

$$W = \begin{bmatrix} T_1 & T_r & T_r & T_r & T_5 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/L \end{bmatrix} \begin{matrix} P_1 \\ P_r \\ P_r \\ P_r \\ P_5 \\ P_5 \end{matrix}$$

اما ماتریس $V(t)$ وابسته به کمان کنترلی می‌باشد. به‌عنوان نمونه باتوجه به شکل ۱۲ گذرگاه t_3 توسط کمان کنترلی، به مکان P_5 متصل شده است. بنابراین سرعت این گذرگاه توسط تعداد نشانه‌های موجود در مکان P_5 یعنی m_5 کنترل می‌شود، پس در ماتریس $V(t)$ سرعت گذرگاه t_3 برابر با m_5 خواهد بود. یعنی سرعت هر گذرگاه باتوجه به این‌که این گذرگاه توسط کمان کنترلی به کدام مکان متصل است تعیین می‌شود؛ و ماتریس $V(t)$ به صورت زیر تشکیل خواهد شد:

$$v(t) = \begin{bmatrix} I_S \\ I_S - m_5 - \frac{1}{R} m_r \\ m_5 \\ \frac{1}{R} m_r \\ m_r \end{bmatrix}$$

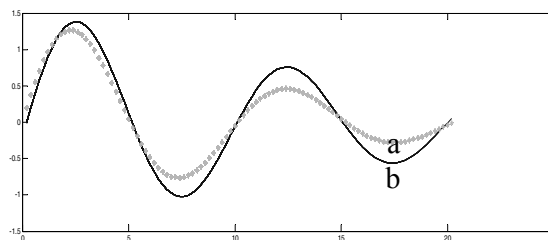


شکل ۱۲- مدل‌سازی مدار RLC موازی با استفاده از شبکه‌های

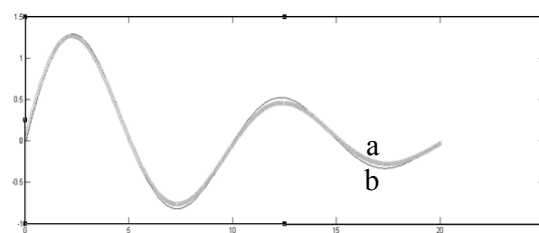
پتری

مزایای شبکه‌های پتری نسبت به زبان‌های مدل‌سازی دیگر می‌توان به بیان صریح حالات و عملیات فرایند، نمایش دقیق پیش‌شرط‌ها و پس‌شرط‌های عملیات، مدل‌سازی ساده‌تر و دقیق‌تر، قابلیت ارزیابی و رفع مشکلات آن نام برد. از دیگر مزایای استفاده از شبکه‌های پتری به‌عنوان ابزاری برای مدل‌سازی، اجزاء محدود آن است که باعث سادگی و قابل فهم بودن مدل پتری ما خواهد شد. حال آن‌که با اضافه شدن هر جزء دیگر به اجزای شبکه‌های پتری مانند کمان کنترلی، پیچیدگی مدل ارائه شده سیستم، بیشتر خواهد شد. اما در صورت وجود کمان کنترلی این امکان برای شبکه‌های پتری فراهم شده است که بتوان توسط آن اکثر سیستم‌های موجود را مانند مدارهای الکتریکی که دارای تغییر شار دو یا چند متغیر می‌باشند، مدل‌سازی نمود. مزیت اصلی استفاده از این روش این است که با توجه به این‌که در علوم مختلف خیلی از سیستم‌ها دارای مدار معادل می‌باشند، در نتیجه می‌توان با در نظر گرفتن مدار معادل آن، مدل پتری سیستم مورد نظر را به‌دست آورد و تحلیل نمود.

با توجه به خاصیت فوق سیستم‌هایی را که تلفیقی از سیستم‌های مکانیکی و مدارهای الکتریکی می‌باشند را می‌توان با شبکه‌های پتری مدل و تحلیل نمود که باعث سادگی و یکنواختی در سیستم مرجع می‌شود.



شکل ۱۳- مقایسه نتایج معادلات حالت و تحلیل شبکه پتری مدار RLC با $dt=0.2$: a) نمودار مدار حالت، b) نمودار شبیه‌سازی شده مدل پتری



شکل ۱۴- مقایسه نتایج معادلات حالت و تحلیل شبکه پتری مدار RLC با $dt=0.05$: a) نمودار مدار حالت، b) نمودار شبیه‌سازی شده مدل پتری

۶- نتیجه‌گیری

شبکه‌های پتری وسیله‌ای برای مطالعه سیستم‌ها می‌باشند. تئوری شبکه پتری اجازه می‌دهد که یک سیستم بتواند به‌وسیله آن به‌صورت یک مدل ریاضی، مدل شود. از رفتار پویا و ساختار سیستم مدل شده توسط آنالیز شبکه پتری، اطلاعات بسیار مفیدی اتخاذ می‌گردد که این اطلاعات می‌تواند جهت ارزشیابی، بهبود یا تغییرات در سیستم استفاده شوند. شبکه‌های پتری برای آنالیز سیستم‌هایی گسترده کاربرد بسزایی دارند. از جمله

مراجع

- [1] Hongxing, Y., Lin, L., Wei, Z. (2007). "A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system". Journal of Solar Energy, Vol. 81, No. 1, pp.76-84.
- [2] Dideban, A., Alla, H. (2008). "Reduction of Constraints for Controller Synthesis based on Safe Petri Nets". Journal of Automatica, Vol. 44, No. 7, pp. 1697-1706.
- [3] Mboup, A., Guerin, F., Lefebvre, D., Ndiaye, P. (2009). "Petri nets control design for hybrid electrical energy systems". Proceeding of the American Control Conference, ACC'09, pp. 5012-5017.

- [4] Javadi, A., Zamani, S., Mohammadian, M. (2011). "Study of the energy management strategies in hybrid distributed generation systems". Proceeding of the 26th International Power System Conference, Tehran-Iran.
- [5] Allard, B., Morel, H., Chante, J. (1993). "Power electronic circuit simulation using bond graph and Petri network technique". Proceeding of the Power Electronics Specialists Conference, 24th Annual IEEE, pp. 27-32.
- [6] Alla, H., Ghomria, L. (2007). "Modeling and analysis using hybrid Petri nets". Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, Vol. 1, No. 2, pp. 141-153.
- [7] Katsigiannis, Y.A., Georgilakis, P.S., Tsinarakis, G.J. (2010). "A novel colored fluid stochastic petri net simulation model for reliability evaluation of Wind/PV/Diesel small isolated power systems". IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, Vol. 40, pp. 1296-1309.
- [8] Wu, Y., Wu, W., Zeng, J., Sun, G., Su, H., Chu, J. (2002). "Modeling and simulation of hybrid dynamical systems with generalized differential Petri nets". Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Intelligent Control, pp. 789-794.
- [9] David, R., Alla, H. (2005). "Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets". Springer, New York.