



مدلسازی، طراحی و پیاده‌سازی کنترل کننده نظارتی گسسته پیشامد در تثبیت ولتاژ

سید محمد نوربخش رضایی^۱ علی اکبر افضلیان^۲

^۱ عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بروجن، ایران

^۲ عضو هیأت علمی دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، تهران، ایران

واژه‌های کلیدی: کنترل نظارتی سیستم‌های گسسته پیشامد، تثبیت ولتاژ، ULTC، SVC، پیاده‌سازی بلادرنگ

چکیده

کنترل ولتاژ در یک شبکه قدرت همواره یکی از مهمترین چالش‌های صنعت برق بوده است. در این مقاله کنترل کننده‌ای جهت هماهنگ ساختن عملکرد دو المان تثبیت ولتاژ، یعنی ترانسفورماتورهای مجهز به تپ-چنجر نوع^۱ ULTC و جبرانگر استاتیکی توان راکتیو (SVC) طراحی گردیده و مسائل مربوط به پیاده‌سازی عملی آن بحث می‌شود. با توجه به رفتار سوئیچینگ ULTC و دینامیک هابیرید مشخصه کنترلی در نظر گرفته شده برای SVC، رفتار کلی سیستم کنترل ولتاژ (متشکل از ULTC و SVC) را می‌توان بصورت یک سیستم گسسته پیشامد مدلسازی نمود، بنابراین بهترین گزینه ممکن برای طراحی کنترلر هماهنگ کننده، استفاده از نظریه کنترل نظارتی گسسته پیشامد خواهد بود. در استفاده از این روش نیازی به در نظر گرفتن مستقیم مسائلی از قبیل وجود تأخیر زمانی و نواحی مرده در مشخصه ULTC،

هابیرید بودن SVC و یا غیر خطی بودن فرآیند نخواهد بود. بهینه بودن سیستم کنترل نظارتی طراحی شده توسط نظریه کنترل نظارتی تضمین می‌گردد. چالش اساسی در بکارگیری نظریه کنترل نظارتی در صنعت، مشکلات مربوط به پیاده سازی عملی آن می‌باشد. در ادامه، انواع این مشکلات بصورت کامل معرفی و دسته‌بندی شده و پس از آن روند استخراج کدهای دیباگرام نردبانی با بهره‌گیری از یکسری روش ابتکاری، برای پیاده‌سازی سیستم کنترل نظارتی طراحی شده بر روی یک PLC ارائه می‌گردد. کد دیباگرام نردبانی استخراج شده را می‌توان بدون نیاز به هیچ‌گونه اصلاحی مستقیماً بر روی حافظه‌ی PLC بارگذاری نمود.

معرفی

کنترل ولتاژ در یک شبکه قدرت همواره یکی از مهمترین چالش‌های صنعت برق بوده است. ترانسفورماتورهای مجهز به تپ-چنجر نوع ULTC بصورت گسترده‌ای جهت تنظیم ولتاژ در شبکه‌های قدرت بکار گرفته می‌شوند. در بسیاری از

^۱ Under Load Tap-Changer

^۲ Static Var Compensator

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

قدرت الکتریکی، مطالبی ارائه شده است. با این وجود، به دلیل وجود مشکلات فراوان بر سر راه پیاده‌سازی عملی یک سیستم کنترل نظارتی، هنوز تعداد اندکی از حوزه‌های کاربردی صنعتی را می‌توان مثال زد که این تئوری را مورد استفاده قرار داده باشند. در این مقاله مشکلات مذکور بصورت اجمالی معرفی و دسته بندی می‌شوند. در ادامه نحوه پیاده‌سازی کنترل کننده طراحی شده بر روی یک PLC ارائه می‌شود. در تولید کد برنامه نویسی PLC کلیه مشکلات مربوطه مد نظر قرار داده خواهند شد. به این ترتیب کدهای دیگر برنامه‌ریزی بدست آمده را می‌توان مستقیماً بر روی یک PLC بارگذاری نمود. لذا این قابلیت بوجود خواهد آمد که بتوان کنترل کننده هماهنگ کننده ولتاژ را بصورت بلادرنگ (real-time) در صنعت بکار گرفت.

در بخش ۲ لزوم ایجاد هماهنگی بین عملکرد ULTC و SVC مورد بحث قرار می‌گیرد. در بخش ۳ تئوری کنترل نظارتی به صورت مختصر معرفی می‌شود. در این رابطه مرجع [۱۲] برای مطالعه بیشتر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در بخش ۴ نیز مدلسازی گسسته پیشامد سیستم و نحوه طراحی سیستم کنترل نظارتی برای هماهنگ سازی ULTC و SVC در دو ساختار متمرکز و غیر متمرکز ارائه می‌گردد. در بخش ۵ به مسئله پیاده‌سازی کنترل کننده ناظر پرداخته می‌شود. نتایج مقاله نیز در بخش ۶ جمع بندی و ارائه خواهند شد.

هماهنگی ULTC و SVC در کنترل ولتاژ

از آنجا که دسته‌ی وسیعی از تجهیزات الکتریکی نظیر موتورهای القایی، لامپهای روشنایی و... جهت کارایی مناسب می‌بایست همواره در ولتاژ نامی کار کنند، بنابراین در بسیاری از موارد بخصوص در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی، جهت تثبیت ولتاژ علاوه بر ULTC از یکسری از ادوات تولید توان راکتیو نظیر جبرانگرهای استاتیکی توان راکتیو SVC، STATCOM و STATCON و یا بانک‌های خازنی نیز بهره گرفته می‌شود [۱۹-۱۳]. در چنین شبکه‌هایی لازم است یک

مواقع به خصوص در سیستم‌های فوق توزیع، به منظور اصلاح سریع تغییرات ایجاد شده در ولتاژ، از ادوات جبرانگر استاتیکی توان راکتیو نظیر SVC نیز در جهت کنترل ولتاژ بهره گرفته می‌شود [۱].

چنانچه این دو المان بصورت همزمان برای تنظیم ولتاژ نقطه‌ای از یک شبکه قدرت مورد استفاده قرار گیرند، برای داشتن حداکثر بهره‌برداری ممکن از این تجهیزات، استفاده از یک استراتژی کنترلی جهت هماهنگ نمودن عملکرد SVC و ULTC ضرورت می‌یابد [۲ و ۳]. برای بهبود عملکرد کلی سیستم، مشخصه کنترلی جدیدی برای SVC بکار گرفته می‌شود که دارای رفتار هایبیرید می‌باشد. به این مفهوم که با بکارگیری این مشخصه کنترلی برای SVC، رفتار دینامیکی این المان ترکیبی از دینامیک پیوسته و دینامیک گسسته خواهد بود. از طرف دیگر با توجه به اینکه ULTC دارای رفتار سوئیچینگ می‌باشد، بنابراین می‌توان کل سیستم کنترل ولتاژ (متشکل از ULTC و SVC) را بصورت گسسته پیشامد مدلسازی نمود و برای طراحی کنترلر هماهنگ کننده، از نظریه کنترل نظارتی بهره گرفت. در این روش نیازی به در نظر گرفتن مستقیم مسائلی از قبیل وجود تأخیر زمانی، وجود نواحی مرده در مشخصه ULTC، و یا غیر خطی بودن رفتار فرآیند نخواهد بود.

در طی دو دهه اخیر سیستم‌های گسسته پیشامد از جنبه‌های گوناگون نظیر مدلسازی، تجزیه و تحلیل و کنترل مورد توجه محققین قرار گرفته است. با مطرح شدن نظریه کنترل نظارتی، زمینه بکارگیری مدل‌های گسسته پیشامد در مورد فرآیندهای دنیای فیزیکی نیز فراهم گردید و به دنبال آن دسته وسیعی از سیستم‌های صنعتی نظیر سیستم‌های کنترل ترافیک، سیستم‌های خطوط تولید کارخانجات صنعتی، سیستم‌های مخابراتی، سیستم‌های پایگاه داده و همچنین سیستم‌های قدرت الکتریکی، در این چهارچوب مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در مقالاتی نظیر [۴-۱۱] در ارتباط با طراحی سیستم کنترل نظارتی، مدلسازی، تجزیه و تحلیل و مانیتورینگ و عیب‌یابی و پیاده‌سازی کنترل کننده ناظر برای سیستم‌های

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

سیستم هماهنگ کننده عملکرد این دو المان را همراستا نماید تا حداکثر بهره‌برداری ممکن از این تجهیزات حاصل شود.

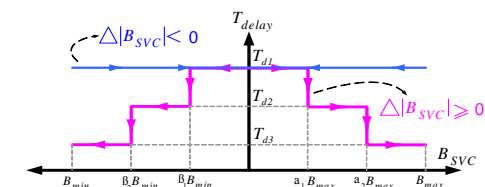
و از طرف دیگر در مواقع خاصی با کاهش مقدار زمان تأخیر تپ-چنجر، امکان عملکرد سریعتر ULTC ایجاد شود.

لزوم ایجاد هماهنگی بین ULTC و SVC

هنگامی که برای تنظیم ولتاژ نقطه خاصی از یک شبکه‌ی قدرت بصورت همزمان هم از SVC و هم از ULTC استفاده می‌شود به دلیل آنکه سرعت عملکرد SVC بسیار بالاتر از سرعت عملکرد ULTC است، SVC در پاسخ به تغییرات ولتاژ بسیار سریعتر از ULTC عمل می‌کند. بدین ترتیب پس از وقوع یک تغییر در مقدار ولتاژ، وظیفه‌ی جبران افت یا افزایش ولتاژ در لحظات اول بر عهده‌ی SVC قرار داده می‌شود و عملاً ULTC کاری انجام نمی‌دهد. این موضوع سبب می‌شود که پس از مدتی ظرفیت SVC بصورت کامل در اختیار گرفته شود و SVC به اشباع می‌رود. در چنین وضعیتی ممکن است به دلیل عدم توانایی SVC در تنظیم ولتاژ، امکان عملکرد ULTC فراهم شود و ULTC بتواند تا حد مشخصی ولتاژ را تنظیم نماید. اما مشکل اصلی این است که به دلیل به اشباع رفتن SVC، امکان اینکه سیستم کنترل ولتاژ (متشکل از SVC و ULTC) بتواند به انحرافات ولتاژ بعدی بسرعت جواب دهد، وجود نخواهد داشت. لذا از آنجا که برای اعمال پاسخ سریع به تغییرات ناگهانی ولتاژ، استفاده از SVC به عنوان یک کنترلر اضطراری، اجتناب ناپذیر است، لذا باید به طریقی ظرفیت SVC برای پاسخ به تغییرات احتمالی آینده، حفظ شود. بنابراین به جهت استفاده مطلوب و حداکثر بهره‌برداری از تجهیزات مذکور، نیاز به استفاده از یک استراتژی کنترلی جهت هماهنگ نمودن عملکرد SVC و ULTC احساس می‌شود. برای انجام چنین کاری باید تغییراتی در سیستم کنترلی این المان‌ها در نظر گرفته شود. به این صورت که در هنگام وقوع یک اغتشاش در اندازه‌ی ولتاژ، برای آنکه علاوه بر SVC، ULTC نیز مجال شرکت در تنظیم ولتاژ را داشته باشد، لازم است از یک طرف در وضعیت‌های خاصی سهم کمتری برای مشارکت SVC در نظر گرفته شود،

اصلاح سیستم کنترلی ULTC

جهت هماهنگ نمودن عملکرد ULTC با SVC در شرایطی که جریان تزریقی SVC به ماکزیمم مقدار خازنی یا سلفی خود نزدیک می‌شود، برای حفظ ظرفیت SVC می‌توان با کاهش زمان تایمر تپ چنجر، ULTC را سریعتر از حالت معمول به واکنش در برابر تغییرات ولتاژ وادار نمود. برای انجام این کار، زمان تأخیر ULTC بصورت تابعی از سوسپتانس SVC، است، در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱- تغییرات زمان تأخیر ULTC در مقابل سوسپتانس SVC

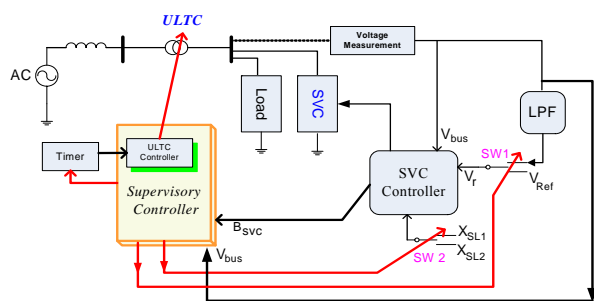
اصلاح سیستم کنترلی SVC

برای بهبود عملکرد SVC در هماهنگی با دیگر ادوات تثبیت ولتاژ، در مقاله [۱۸] مشخصه‌ی کنترلی جدیدی برای SVC پیشنهاد گردیده است که دارای رفتار هایبرید می‌باشد و در شکل ۲ ارائه شده است. بر طبق این مشخصه، هنگامی که ولتاژ محل مورد نظر از شبکه‌ی قدرت (که SVC به آن نقطه متصل شده است) در محدوده‌ی خاصی قرار داشته باشد، شیب مشخصه‌ی کنترلی SVC دارای مقدار X_{SL1} است و ولتاژی که به عنوان ولتاژ مرجع به کنترل کننده‌ی SVC (کنترلر PI) اعمال می‌شود، مقداری است که بهره‌بردار شبکه‌ی قدرت تمایل دارد ولتاژ در آن مقدار تثبیت شود (V_{ref}). اما هنگامی که ولتاژ شبکه از یک حد خاصی کمتر یا بیشتر شود، شیب مشخصه‌ی کنترلی برابر X_{SL2} انتخاب می‌شود که مقدار آن کمتر از X_{SL1} است. این موضوع باعث می‌شود که در این شرایط، SVC مقدار ولتاژ شبکه را به مقدار مطلوب بیشتر نزدیک نماید. از طرفی در این شرایط

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

نحوه‌ی ایجاد هماهنگی بین SVC و ULTC

بهترین گزینه‌ی ممکن برای نحوه‌ی پیاده‌سازی تغییرات در سیستم کنترلی مرسوم SVC و ULTC به این صورت است که با حفظ همان کنترلرهای مرسوم این المان‌ها، تغییرات مورد نیاز توسط یک سیستم نظارتی اعمال شوند. با اضافه نمودن سیستم کنترل نظارتی جدید می‌توان کیفیت انرژی الکتریکی شبکه‌ی توزیع را بهبود داد و درجه‌ی آسیب‌پذیری بارهای (مصرف کنندگان) حساس به ولتاژ را کاهش داد. بلوک دیگرام عملیاتی در نظر گرفته شده برای سیستم کنترل هماهنگ ولتاژ در شکل ۴ ارائه شده است.

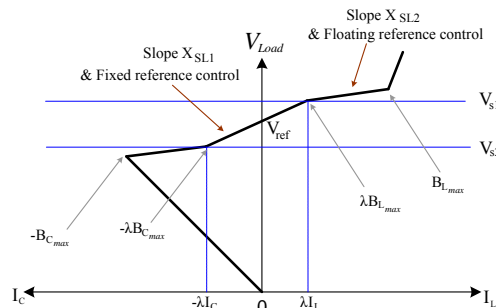


شکل ۴- بلوک دیگرام سیستم کنترلی هماهنگ کننده‌ی ولتاژ

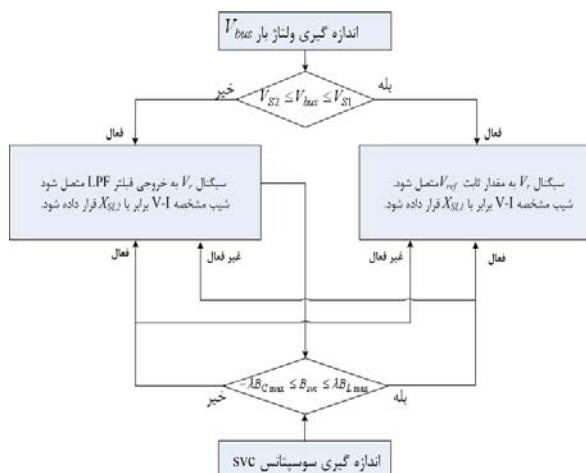
کنترل نظارتی سیستم های گسسته پیشامد

یک سیستم گسسته پیشامد (DES) سیستمی است که دارای رفتار دینامیکی آسنکرون بوده و در اثر وقوع آنی سلسله پیشامدها در نمونه‌های زمانی گسسته، از یک حالت به حالت دیگر تغییر وضعیت می‌دهد [۱۲]. تکنیک کنترل نظارتی ابزاری است که معمولاً برای کنترل این دسته از سیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای استفاده از این تکنیک در قدم اول باید فرایند گسسته پیشامد را بصورت یک اتوماتان مدلسازی نمود. اتوماتان یک ۵- تایی است که بصورت $G = (Q, \Sigma, \eta, q_0, Q_m)$ تعریف می‌شود. Q مجموعه‌ی متناهی از حالت‌های سیستم گسسته پیشامد، $q_0 \in Q$ حالت اولیه و $Q_m \subseteq Q$ مجموعه‌ای شامل تمامی حالت‌های مورد نظر این سیستم می‌باشد. Σ نیز مجموعه‌ای متناهی از تمامی پیشامدها می‌باشد. حالت بعدی تحت وقوع پیشامد σ توسط تابع گذر از حالت $\eta(q, \sigma)$ مشخص می‌شود که بصورت

ولتاژی که به عنوان ولتاژ مرجع به کنترل کننده‌ی SVC اعمال می‌شود، خروجی یک فیلتر پایین گذر (LPF) خواهد بود که ورودی این فیلتر به ولتاژ محل مورد نظر شبکه متصل است. لذا رفته رفته خطای ولتاژی که کنترل کننده‌ی PI حس میکند، کاهش یابد و مقدار جریان تزریقی SVC به شبکه کاهش داده شود. به این ترتیب به مرور زمان SVC ظرفیت کمتری در اختیار شبکه قرار خواهد داد. هر گاه که ظرفیت SVC (یعنی همان مقدار سوسپتانس این المان) به حد مجاز برگشت، مجدداً مقدار X_{SL1} به عنوان شیب مشخصه‌ی کنترلی و مقدار V_{ref} به عنوان ولتاژ مرجع قرار داده می‌شوند. فلوچارت این منطق کنترلی در شکل ۳ ارائه گردیده است.



شکل ۲- مشخصه V-I جدید جبرانگر استاتیکی توان راکتیو



شکل ۳- فلوچارت منطق کنترلی SVC متناظر با مشخصه‌ی V-I جدید

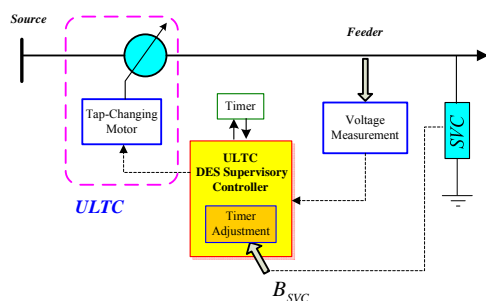
بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

داده شده است. اجزاء تشکیل دهنده این بلوک کنترلی عبارتند از ولت‌متر، تایمر، تنظیم کننده تایمر و تغییر دهنده تپ ترانس. برای آنکه عملکرد ULTC در هر دو مد کاری Auto و Manual بصورت کامل در قالب یک مدل گسسته پیشامد تعریف شود، باید اپراتور نیز مدل شود. در لحظاتی که کنترلر اتوماتیک نمی‌تواند تپ ترانس را بصورت موفقیت آمیز تغییر دهد، اپراتور می‌تواند کنترل تپ-چنجر را بصورت دستی انجام دهد.

با در نظر داشتن نوع عملکرد در نظر گرفته شده برای هر بخش، این اجزا بصورت مجزا مدلسازی گردیده‌اند که اتوماتان مدل گسسته پیشامد آنها در شکل ۷ ارائه شده است. اعداد روی گذرها معرف پیشامدها می‌باشند. به عنوان نمونه تعاریف پیشامدهای اتوماتان مدل تنظیم کننده تایمر در جدول ۱ ارائه شده است. با ترکیب اتوماتان مدل گسسته پیشامد اجزا با استفاده از نرم افزار TCT، مدل گسسته پیشامد ULTC بصورت زیر بدست می‌آید.

ULTC-PLANT = Sync(VOLTMETR, TAP-CHANGER, TIMER, TIME_SVC, OPERATOR) (252,2210)

مشاهده می‌شود که اتوماتان مدل گسسته پیشامد ULTC دارای ۲۵۲ حالت و ۲۲۱۰ گذر از حالت می‌باشد و بنابراین مدلسازی متمرکز آن کار بسیار دشواری می‌باشد. به همین دلیل از روش مدلسازی مدولار (غیر متمرکز) بهره گرفته شد.



شکل ۶- بلوک دیاگرام سیستم کنترل ULTC

$Q \rightarrow \Sigma \times Q: \eta$ تعریف می‌گردد. پس از مدلسازی فرایند، منطق کنترلی مطلوب را نیز باید بصورت یک اتوماتان بیان نمود. با داشتن اتوماتان فرایند (G) و اتوماتان منطق کنترلی (EDES)، می‌توان کنترل ناظر Supervisor را با استفاده از نرم افزار TCT [۱۲] بصورت زیر طراحی نمود:

Supervisor = SUPCON(G, EDES)

کنترل ناظر در واقع سلسله پیشامدهایی را که توسط فرایند تولید می‌شوند دریافت نموده و با غیر فعال نمودن یکسری از پیشامدهای کنترل پذیر، باعث می‌شود که سیستم حلقه بسته منطق کنترلی مطلوب را برآورده سازد.

طراحی سیستم کنترل نظارتی هماهنگ کننده

سیستم کنترل نظارتی هماهنگ کننده ULTC و SVC با دریافت مقادیر ولتاژ شبکه و سوسپتانس SVC مسئول انجام موارد زیر می‌باشد:

* کنترل عملکرد ULTC در دو مد کاری Automatic و Manual
* هماهنگ نمودن ULTC با توجه به SVC از طریق اعمال فرمان لازم به تایمر تپ-چنجر

* تنظیم مد کنترلی SVC با توجه به ULTC از طریق اعمال فرمان‌های لازم به حلقه‌ی کنترلی SVC
برای طراحی این سیستم کنترل نظارتی، مراحل زیر به ترتیب باید طی شوند.

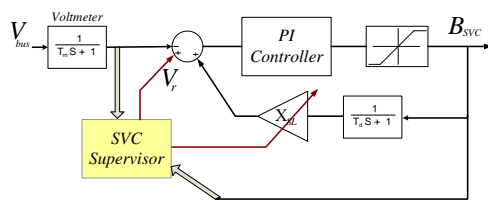
مدلسازی گسسته پیشامد فرآیند

برای بدست آوردن مدل گسسته پیشامد فرآیند ابتدا هر یک از قسمت‌های تشکیل دهنده آن در قالب یک مدل گسسته پیشامد مدلسازی می‌شوند. با ترکیب این مدل‌ها، مدل گسسته پیشامد کل فرآیند نیز بدست خواهد آمد.

الف- مدلسازی گسسته پیشامد ULTC

بلوک دیاگرام کنترلی در نظر گرفته شده برای ULTC با توجه به تأثیر رفتار SVC بر عملکرد تپ-چنجر، در شکل ۶ نشان

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق



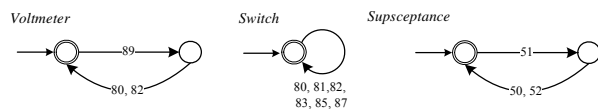
شکل ۸- بلوک دیاگرام سیستم کنترلی SVC

صورت می‌گیرد. کنترل کننده PI به همراه کنترل کننده ناظر SVC، مجموعاً مشخصه کنترلی SVC در شکل ۲ را پیاده می‌کنند. کنترل کننده ناظر SVC به اطلاعات مربوط به اندازه دامنه ولتاژ باس و مقدار سوسپتانس بکار گرفته شده‌ی SVC نیاز دارد. در جدول ۲ پیشامدهای مورد نیاز برای طراحی این کنترل ناظر ارائه شده است. مدل گسسته پیشامد اجزا مختلف سیستم کنترل گسسته SVC در شکل ۹ ارائه شده است. مدل گسسته پیشامدی از SVC که اطلاعات مورد نیاز را در بر داشته باشد را می‌توان با ترکیب مدل‌های ارائه شده در شکل ۹ بصورت زیر بدست آورد.

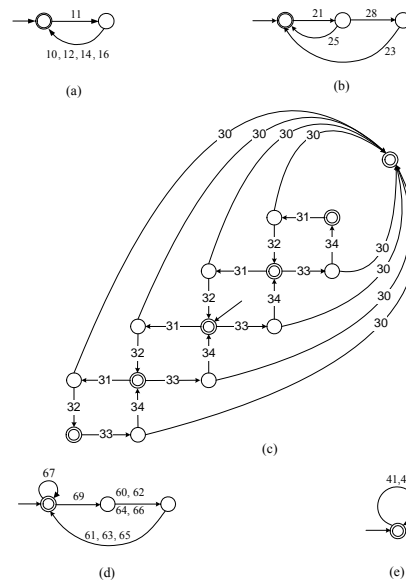
$$\text{SVC-PLANT} = \text{Sync(VOLTMETER, SWITCH, SUSCEPTANCE)} (4,28)$$

جدول ۲- پیشامدهای مربوط به مدل گسسته پیشامد SVC

پیشامد	شرح پیشامد
89	فرمان راه اندازی ولت‌متر
80	$V_{S2} \leq V_{bus} \leq V_{S1}$
81	فرمان اتصال سیگنال V_r به مقدار ثابت V_{ref}
82	$V_{bus} < V_{S1}$ یا $V_{bus} > V_{S2}$
83	فرمان اتصال سیگنال V_r به خروجی فیلتر LPF
85	شیب مشخصه V-I برابر با X_{SL1} قرار داده شود.
87	شیب مشخصه V-I برابر با X_{SL2} قرار داده شود.
51	فرمان راه‌اندازی سنجش مقدار سوسپتانس SVC
50	$-\lambda B_{C \max} \leq B_{svc} \leq \lambda B_{L \max}$
52	$B_{svc} < -\lambda B_{C \max}$ یا $B_{svc} > \lambda B_{L \max}$



شکل ۹- اتوماتان اجزاء تشکیل دهنده رفتار گسسته پیشامد SVC



شکل ۷- اتوماتان مدل گسسته پیشامد (a) ولت‌متر، (b) تایمر (c) تغییر دهنده تپ ترانسفورماتور، (d) تنظیم کننده زمان تایمر، (e) اپراتور

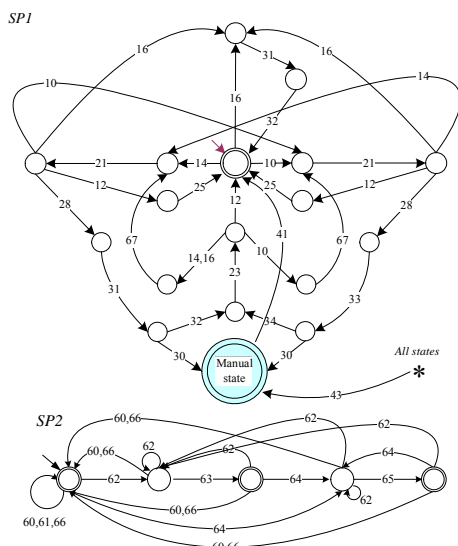
جدول ۱- پیشامدهای مربوط به تنظیم کننده تایمر ULTC

$\beta_1 B_{min} \leq B_{svc} < 0$ یا $0 \leq B_{svc} \leq \alpha_1 B_{max}$	60
مقدار T_{delay} برابر T_{d1} قرار داده شود.	61
$\beta_2 B_{min} \leq B_{svc} < \beta_1 B_{min}$ یا $\alpha_1 B_{max} < B_{svc} \leq \alpha_2 B_{max}$	62
مقدار T_{delay} برابر T_{d2} قرار داده شود.	63
$B_{min} \leq B_{svc} < \beta_2 B_{min}$ یا $\alpha_2 B_{max} < B_{svc} \leq B_{max}$	64
مقدار T_{delay} برابر T_{d3} قرار داده شود.	65
$\Delta B_{svc} < 0$ یا $ B_{svc}' < 0$	66
مقدار تایمر برابر با $T_{switching}$ قرار داده شود	67
فرمان راه اندازی بخش اندازه گیر سوسپتانس SVC	69

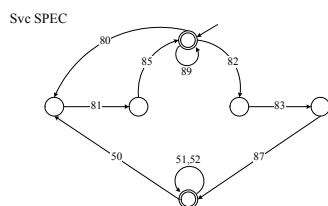
ب- مدلسازی گسسته پیشامد SVC

با توجه به مشخصه کنترلی در نظر گرفته شده برای SVC، این المان دارای یک دینامیک هایبرید یعنی ترکیبی از دینامیک پیوسته و دینامیک گسسته می‌باشد. بلوک دیاگرام سیستم کنترلی در نظر گرفته شده برای SVC در شکل ۸ نشان داده شده است. کنترل دینامیک پیوسته SVC از طریق یک کنترل کننده PI و کنترل دینامیک گسسته آن از طریق کنترل ناظر

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۱۰- اتوماتان مدل گسسته پیشامد مشخصه‌های کنترلی در نظر گرفته شده برای عملکرد ULTC



شکل ۱۱- اتوماتان مدل گسسته پیشامد مشخصه‌های کنترلی در نظر گرفته شده برای SVC

هر کدام از مشخصه‌های کنترلی $Sp1$ و $Sp2$ در قالب یک مدل گسسته پیشامد (اتوماتان) بیان می‌گردند که اتوماتان آنها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با ترکیب اتوماتان‌های مذکور، می‌توان اتوماتانی که دربردارنده کلیه مشخصات کنترلی در نظر گرفته شده برای ULTC باشد را بصورت زیر بدست آورد.

$$ULTC_SPEC = \text{Sync}(SP1, SP2) (205,3838)$$

ب- مشخصه‌های کنترلی SVC

فلوچارت ارائه شده برای کنترل SVC (شکل ۳) در واقع همان مشخصه‌ی کنترلی SVC می‌باشد که باید بصورت یک اتوماتان گسسته پیشامد تعریف شود. مدل گسسته پیشامد این

مدل گسسته پیشامد کل فرآیند با ترکیب مدل‌های استخراج شده برای ULTC و SVC بصورت زیر بدست می‌آید:

$$PLANT = \text{Sync}(ULTC-PLANT, SVC-PLANT) (1008,15896)$$

مشاهده می‌شود که مدل گسسته پیشامد کل فرآیند اتوماتان بسیار بزرگی است که متشکل از ۱۰۰۸ حالت گسسته و ۱۵۸۹۶ گذر از حالت می‌باشد.

مدلسازی گسسته پیشامد مشخصه‌های کنترلی

همانطوری که قبلاً نیز ذکر گردید، جهت طراحی سیستم کنترل نظارتی لازم است مشخصه‌های کنترلی مورد نظر نیز در قالب یکسری مدل گسسته پیشامد (اتوماتان) تعریف گردند.

الف- مشخصه‌های کنترلی ULTC

منطق کنترلی ترانسفورماتورهای مجهز به تپ-چنجر نوع ULTC در مقالاتی نظیر [۱] و [۲۰] ارائه شده است. بطور کلی برای اینکه بتوان توسط کنترل کننده‌ی ناظر، ULTC را کنترل نمود و همچنین عملکرد آن را نیز با SVC هماهنگ نمود، لازم است دو مشخصه‌ی کنترلی زیر در نظر گرفته شوند:

الف- مشخصه کنترلی اصلی ($Sp1$) که رفتار کلی ULTC را هدایت می‌نماید. به این صورت که هنگامی که اندازه ولتاژ خارج از محدوده مجاز باشد، کنترل کننده تپ چنجر پس از گذشت مدت زمان مشخص T_{delay} ، با تغییر دادن تپ ترانسفورماتور در جهت باز گرداندن مقدار ولتاژ به اندازه نرمال عمل می‌نماید. لحاظ نمودن تأخیر در عملکرد کنترل کننده برای جلوگیری از تغییر غیر ضروری تپ ترانسفورماتور می‌باشد،

ب- مشخصه کنترلی دوم ($Sp2$) که جهت تنظیم زمان تایمر با توجه به سوسپتانس SVC در نظر گرفته می‌شود. این مشخصه کنترلی در واقع، بیان گسسته پیشامد تابع ارائه شده در شکل ۱ می‌باشد.

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

مشخصه‌ی کنترلی در قالب یک اتوماتان بصورت آنچه در شکل ۱۱ ارائه شده است، بیان می‌گردد.

طراحی سیستم کنترل نظارتی

پس از بدست آوردن مدل گسسته پیشامد کل فرآیند، می‌بایست مدل گسسته پیشامدی که بیان کننده کلیه مشخصات کنترلی باشند را نیز محاسبه نمود. برای بدست آوردن رفتار مشترکی که توسط مشخصه‌های کنترلی اعمال می‌شود، از الگوریتمی به نام Meet بهره گرفته می‌شود.

$$\text{Specification} = \text{Meet}(\text{ULTC_SPEC}, \text{SVC_SPEC}) (1230, 12778)$$

با در اختیار داشتن مدل گسسته پیشامد فرآیند (PLANT) و همچنین مدل بیان کننده‌ی رفتار مشترک کلیه‌ی مشخصه‌های کنترلی (Specification)، کنترل کننده‌ی ناظر یکپارچه بصورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$\text{Supervisor} = \text{Supcon}(\text{PLANT}, \text{Specification}) (10800, 53532)$$

به علت بزرگ بودن اندازه‌ی این کنترل کننده، در اینجا از ارائه شکل اتوماتان آن صرف نظر شده است. این کنترل کننده‌ی ناظر در هر حالت از طریق غیر فعال نمودن یکسری از پیشامدهای کنترل پذیر، فرآیند را در جهت هدایت می‌کند که مشخصه‌های کنترلی در نظر گرفته شده به بهینه‌ترین صورت ممکن در رفتار فرآیند تحت نظارت برآورده شوند. منظور از بهینه بودن این است که کنترل کننده‌ی ناظر مذکور جهت تحقق کامل مشخصه‌های کنترلی در نظر گرفته شده، کمترین محدودیت ممکن را بر رفتار فرآیند اعمال می‌نماید.

کنترل کننده ناظر متمرکز طراحی شده دارای اندازه‌ی بسیار بزرگی است که پیاده‌سازی عملی آن را دشوار می‌نماید. با توجه به اینکه می‌توان تقریباً عملکرد کنترلی "ULTC و SVC" را مستقل از یکدیگر تصور نمود، چنانچه بجای استفاده از یک سیستم کنترل نظارتی متمرکز (یکپارچه)، برای هر کدام از این ادوات بصورت جداگانه یک کنترل کننده‌ی ناظر طراحی شود، اندازه‌ی سیستم کنترل نظارتی که متشکل

از دو کنترل کننده‌ی ناظر می‌باشد، تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش خواهد یافت.

الف- طراحی کنترل کننده ناظر برای ULTC

برای طراحی کنترل کننده ناظر ULTC که مطابق بلوک دیاگرام ارائه شده در شکل ۶ مسئول کنترل کامل رفتار ULTC و همچنین مسئول هماهنگ نمودن عملکرد آن با SVC باشد، بصورت زیر عمل می‌شود:

$$\text{ULTC_Supervisor} = \text{Supcon}(\text{ULTC-PLANT}, \text{ULTC_SPEC}) (1350, 5004)$$

توسط برخی الگوریتم‌های ابتکاری می‌توان نسخه‌ای از کنترل کننده‌ی ناظر را محاسبه نمود که دارای اندازه‌ی کوچکتری از کنترل کننده‌ی ناظر اصلی باشد ولی از لحاظ رفتاری که بر فرآیند تحمیل می‌نماید هم ارز آن باشد. دستور Supreduce در TCT در بردارنده‌ی یکی از الگوریتم‌های مذکور می‌باشد:

$$\text{Reduced-ULTC-Sup} = \text{Supreduce}(\text{ULTC-PLANT}, \text{ULTC_Supervisor}, \text{Control_Data}) (36, 165; \text{slb}=36)$$

ب- طراحی کنترل کننده ناظر برای SVC

همانطوری که در بلوک دیاگرام سیستم کنترلی SVC مشخص شده است (شکل ۸)، برای اینکه بصورت غیر مستقیم بتوان SVC را با ULTC هماهنگ نمود، سیستم کنترل نظارتی باید در شرایط خاصی مد کنترلی SVC را تغییر می‌دهد. این کنترل کننده ناظر بصورت زیر قابل محاسبه خواهد بود.

$$\text{SVC_Supervisor} = \text{Supcon}(\text{SVC-PLANT}, \text{SVC-SPEC}) (8, 10)$$

$$\text{Reduced_SVC_Sup} = \text{Supreduce}(\text{SVC-PLANT}, \text{SVC_Supervisor}, \text{Control_Data}) (6, 16; \text{slb}=6)$$

در شکل ۱۲ اتوماتان کنترل کننده‌ی ناظر SVC نشان داده شده است. این کنترل کننده ناظر در هر کدام از حالت‌ها از وقوع یکسری از پیشامدهای کنترل پذیر جلوگیری می‌نماید، و بدین طریق به بهینه‌ترین شکل ممکن مشخصه‌ی کنترلی مورد نظر را بر رفتار فرآیند (SVC-PLANT) تحمیل می‌نماید. لیست پیشامدهای کنترل پذیری که در هر کدام از حالت‌ها توسط

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

داشت. نویسندگان در مراجع [9] مشکلات عام پیاده‌سازی عملی یک سیستم کنترل نظارتی بر روی PLC و همچنین نحوه فائق آمدن بر هر کدام از این مشکلات را به تفصیل مورد بحث قرار داده‌اند. در قسمت زیر به صورت اجمالی این مشکلات دسته بندی گردیده‌اند:

* **Avalanche Effect**: چنانچه در طول یک سیکل اسکن PLC، در اثر وقوع یک پیشامد خاص، چندین تغییر حالت رخ دهد مشکلی موسوم به **Avalanche Effect** بوجود می‌آید. این مشکل باعث می‌شود که PLC که نقش کنترل ناظر را ایفا می‌کند از وضعیت سنکرون بودن با فرآیند خارج شود.

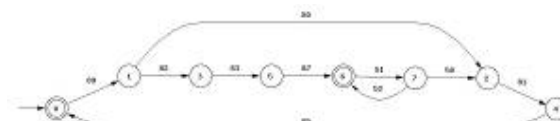
* **همزمانی وقوع پیشامدها**: در یک مدل گسسته پیشامد در هر لحظه از زمان فقط یک پیشامد رخ می‌دهد، در صورتیکه در PLC این احتمال وجود دارد که در طول یک سیکل اسکن چندین متغیر که متناظر با چندین پیشامد می‌باشند بصورت همزمان دارای ارزش منطقی 1 شوند.

* **علی بودن**: در تئوری کنترل نظارتی این‌طور فرض شده است که فرایند کنترل نشده، همه‌ی پیشامدها را تولید می‌کند و کنترل ناظر فقط برخی از این پیشامدها را غیرفعال می‌کند. در حالیکه در عمل به این صورت است که فرآیند کنترل نشده در پاسخ به فرمان‌هایی که کنترل کننده ناظر تولید نموده رفتار می‌نماید. بنابراین در مرحله‌ی پیاده‌سازی و تحقق عملی تئوری کنترل نظارتی، خاصیت علی بودن سیستم حلقه بسته مورد شک قرار می‌گیرد.

* **چگونگی انتخاب بین مسیرهای مختلف**: کنترل ناظر باید بگونه‌ای طراحی شود که در کمترین حد ممکن رفتار فرایند را محدود کند. بنابراین امکان وجود چندین مسیر خروجی برای یک حالت وجود دارد. چنانچه این مسیرهای خروجی تحت پیشامدهای کنترل‌ناپذیر باشند، وقوع یکی از این پیشامدها در فرایند خود بخود مسیر خروجی از آن حالت را مشخص می‌نماید. مشکل وقتی ظاهر می‌شود که برای یک حالت، چندین مسیر خروجی تحت پیشامدهای کنترل‌پذیر وجود داشته باشد. در این حالت باید توسط PLC (به عنوان

کنترل کننده‌ی ناظر SVC-Supervisor غیرمجاز محسوب می‌شوند، بصورت زیر می‌باشند:

0: 51 81 83 85 87	1: 51 81 83 85 87
2: 51 83 85 87 89	3: 51 81 85 87 89
4: 51 81 83 87 89	5: 51 81 83 85 89
6: 81 83 85 87 89	7: 81 83 85 87 89



شکل ۱۲- اتوماتان مدل گسسته پیشامد کنترل کننده ناظر محلی SVC

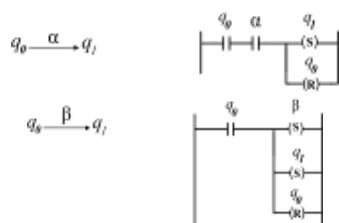
پیاده‌سازی سیستم کنترل نظارتی گسسته پیشامد

در این بخش در ابتدا مشکلات عام پیاده‌سازی عملی یک سیستم کنترل نظارتی دسته بندی و بصورت اجمالی معرفی می‌گردند. پس از آن مسئله پیاده‌سازی سیستم کنترل نظارتی هماهنگ کننده عملکرد ULTC و SVC، یعنی نحوه‌ی بدست آوردن کد دیاگرام نردبانی معادل سیستم کنترل نظارتی تشریح خواهد شد. کدهای دیاگرام نردبانی حاصله این قابلیت را دارا خواهند بود که مستیماً در حافظه‌ی یک PLC بارگذاری شوند و بدین ترتیب امکان بکارگیری کنترل کننده‌ی های ناظر طراحی شده در صنعت فراهم خواهد شد.

مشکلات پیاده‌سازی سیستم کنترل نظارتی

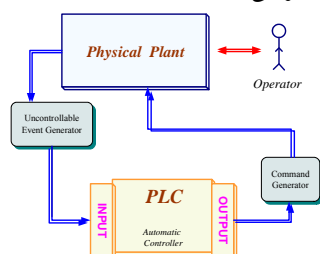
معمولاً برای پیاده‌سازی عملی کنترل کننده‌ی یک فرآیند صنعتی از کنترل‌کننده‌های منطقی برنامه پذیر (PLC) استفاده می‌شود. چرا که اولاً دارای صرفه‌ی اقتصادی بسیار بالایی است و ثانیاً موجب ایجاد انعطاف پذیری بالا در طراحی می‌شود. بنابراین با توجه گستردگی کاربرد PLC در صنعت، یکی از بهترین گزینه‌های ممکن برای پیاده‌سازی عملی یک کنترل‌ناظر نیز استفاده از PLC می‌باشد. اما در حرکت از یک مدل گسسته پیشامد که ذاتاً بصورت **آسنکرون** رفتار نموده و توسط وقوع **پیشامدها** هدایت می‌شود، به سمت PLC با طبیعتی **سنکرون** که بر اساس **سیگنال‌های زمانی** (و نه پیشامدها) عمل می‌نماید، مشکلات فراوانی وجود خواهد

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

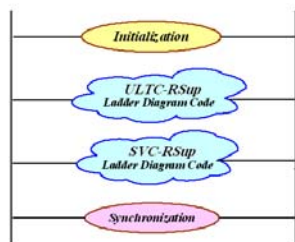


شکل ۱۳- نحوه‌ی پیاده‌سازی گذار از حالت تحت پیشامد کنترل ناپذیر α و پیشامد کنترل پذیر β

روشی که در مورد سیستم کنترل نظارتی هماهنگ کننده‌ی عملکرد ULTC و SVC بکار گرفته می‌شود به این صورت است که با توجه به بزرگ بودن ابعاد سیستم کنترل نظارتی یکپارچه، اولاً ساختار غیر متمرکز سیستم کنترل نظارتی مد نظر قرار داده می‌شود و ثانیاً از نسخه‌های کاهش مرتبه داده شده‌ی کنترل کننده‌های ناظر استفاده می‌گردد. برای اطمینان از اینکه هر دو کنترل کننده‌ی ناظر محلی بصورت سنکرون با یکدیگر عمل کنند، اتوماتن این دو کنترل کننده‌ی ناظر در قالب یک کد دیگرام نردبانی واحد که در شکل ۱۵ ارائه شده است، بر روی PLC پیاده می‌شوند. بخش ابتدایی و انتهایی این کد (شکل ۱۶) مربوط به راه‌اندازی و همزمان‌سازی کنترل کننده‌ها با یکدیگر می‌باشند.



شکل ۱۴- شماتیک سیستم کنترلی بکار گرفته شده جهت هماهنگ سازی عملکرد ULTC و SVC



شکل ۱۵- شماتیک ساختار کلی کد دیگرام نردبانی سیستم کنترل نظارتی پودمانی هماهنگ کننده SVC و ULTC

کنترل ناظر) یکی از این پیشامدها فعال شود که ممکن است به بلوکه شدن فرآیند تحت نظارت منجر شود.

* مشکل تأخیر زمانی در انتقال دیتا بین فرآیند و PLC به عنوان کنترل کننده‌ی فرآیند

* غیر واقعی بودن همزمانی فرایند و PLC: با آنکه می‌توان مدت زمان اجرای یک سیکل برنامه یا سیکل اسکن PLC را در مقابل ثابت زمانی فرایند ناچیز تصور نمود، اما نمی‌توان تضمین نمود که فرایند و کنترل ناظر (PLC) هم‌فاز باشند، چرا که در خلال اجرای برنامه در طول یک سیکل برنامه، PLC هیچ اطلاعی از دنیای خارج ندارد.

* اندازه‌ی اتوماتن کنترل ناظر: در بسیاری از مواقع چنانچه یک فرآیند فیزیکی در قالب یک مدل گسسته پیشامد مدلسازی شود، تعداد حالت‌های اتوماتن حاصله بسیار زیاد خواهد شد. این امر سبب خواهد شد که اندازه‌ی اتوماتن کنترل ناظر طراحی شده برای آن فرآیند نیز بزرگ شود. حتی این امکان وجود دارد که برای فرآیندی که مدل گسسته پیشامد آن نیز دارای اندازه‌ی کوچکی است، کنترل ناظری طراحی شود که تعداد حالت‌های آن بسیار زیاد باشد.

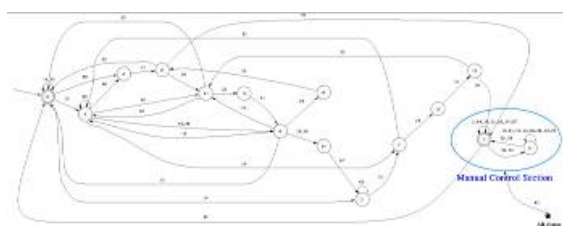
بدست آوردن کد دیگرام نردبانی (LLD) معادل اتوماتن سیستم کنترل نظارتی

مسئله پیاده‌سازی کنترل ناظر بر روی PLC در چندین مرجع از جمله [۷ و ۸] و [۲۱-۲۵] مورد توجه قرار گرفته است. در هر کدام از این مراجع در واقع روشی برای تبدیل اتوماتن سیستم کنترل نظارتی یکپارچه به زبان LLD یا همان دیگرام نردبانی که یکی از معمول‌ترین زبان‌های برنامه‌نویسی PLC می‌باشد، ارائه شده است. بطور کلی برای تبدیل اتوماتن یک کنترل کننده‌ی ناظر به کد دیگرام نردبانی، می‌بایست متناظر با هر کدام از حالت‌ها و پیشامدهای اتوماتن مذکور یک متغیر در نظر گرفت. (شکل ۱۳).

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

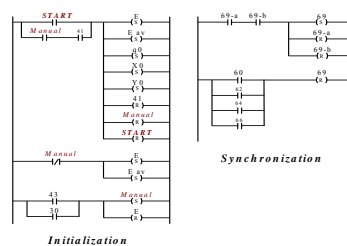
* از هر کدام از حالت‌های اتوماتان باید مسیری جهت رسیدن به حداقل یکی از حالت‌های مورد نظر وجود داشته باشد، بصورتیکه این مسیر مستقل از محدودیت‌های زمانی وقوع پیشامدهای کنترل ناپذیر فرآیند باشد.

برای پیاده‌سازی سیستم کنترل ناظر غیر متمرکز طراحی شده برای هماهنگ‌سازی ULTC و SVC، اتوماتان‌های کاهش مرتبه یافته‌ی دو کنترل ناظر مد نظر قرار می‌گیرد. پس از اینکه کلیه موارد مربوطه در این دو اتوماتان چک گردید، مشکلات مربوطه با استفاده از یکسری تکنیک‌های ابتکاری از جمله، تفکیک مدهای کنترلی اتوماتیک و manual، تفکیک حالت‌های اتوماتان، تعریف پیشامدهای جدید، ساده‌سازی مدل‌های مشخصات کنترلی، و ... مرتفع می‌گردد. به عنوان نمونه در شکل ۱۷ بخشی از اتوماتان کاهش مرتبه داده شده کنترل ناظر ULTC نشان داده شده است. با بررسی این اتوماتان مشاهده می‌شود که این اتوماتان قادر به ذخیره



شکل ۱۷- بخشی از اتوماتان نسخه‌ی کاهش مرتبه یافته‌ی اولین کنترل کننده‌ی ناظر محلی ساختار پودمانی

اطلاعات مربوط به جهت تغییر تپ مرحله‌ی قبل نمی‌باشد. پس از بررسی می‌توان به این نتیجه رسید که منشاء مشکل فوق به حالت "6" اتوماتان مذکور بر می‌گردد. در واقع هنگامیکه تپ ترانسفورماتور کاهش داده شود و همچنین هنگامیکه تپ افزایش داده شود، در هر دو وضعیت به حالت "6" خواهیم رسید! مشکل دیگر این است که در این اتوماتان محدودیت تعداد پله‌های تپ-چنجر در نظر گرفته نشده است. همچنین با بررسی چند سناریو، مشاهده می‌شود که امکان گرفتار شدن کنترلر در یک لوپ نامحدود نیز در این اتوماتان وجود دارد. پس از ریشه‌یابی علل مشکلات و اصلاح کلیه موارد مربوطه، نهایتاً این قسمت از اتوماتان مذکور به صورت



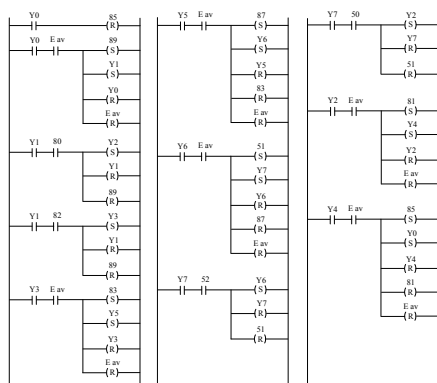
شکل ۱۶- کد دیاگرام نردبانی بخش راه اندازی اولیه و بخش سنکرون سازی متغیرهای متناظر با پیشامدهای مشترک

معمولاً نسخه‌های کاهش مرتبه داده شده خالی از اشکال نمی‌باشند و با استفاده از آنها نمی‌توان به برآورده شدن همه‌ی مشخصات کنترلی در نظر گرفته شده مطمئن بود. زیرا الگوریتم Supreduce، سعی می‌نماید با ترکیب حالت‌های اتوماتان یک کنترل ناظر، اندازه‌ی آن را کاهش دهد که ممکن است باعث بوجود آمدن یکسری مشکلات در این اتوماتان شود. بنابراین قبل از هر چیز لازم است با بررسی اتوماتان کاهش مرتبه داده شده و با ایجاد یکسری تغییرات نظیر تفکیک حالت‌ها، اتوماتان نسخه‌ی کاهش مرتبه داده شده را در جهت برآورده شدن تمامی مشخصات کنترلی مورد نظر اصلاح نمود. در قدم بعد برای تبدیل این اتوماتان به یک کد دیاگرام نردبانی برای اینکه این کد کاملاً معادل اتوماتان مذکور باشد، لازم است یکسری ویژگی در این اتوماتان بررسی شود. با اصلاح اتوماتان مذکور در جهت برآورده‌سازی این ویژگی‌ها، می‌توان اطمینان حاصل کرد که با پیاده‌سازی این اتوماتان اصلاح شده بر روی PLC، تمامی مشخصات کنترلی در نظر گرفته شده عملاً در رفتار فرآیند تحت کنترل (فرآیند حلقه بسته) برآورده خواهند شد. بر طبق تجربیات نویسندگان این مقاله، ویژگی‌هایی که اتوماتان کنترل کننده‌ی ناظر باید در بردارنده‌ی آنها باشد، را بصورت زیر پیشنهاد می‌شوند:

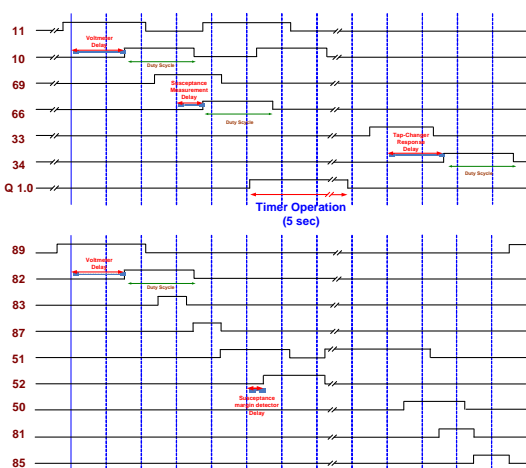
* در اتوماتان کنترل کننده‌ی ناظر نباید هیچ لوپ نامحدودی متشکل از پیشامدهای کنترل پذیر باشد وجود داشته باشد.

* چنانچه در اتوماتان کنترل کننده‌ی ناظر حالتی وجود داشته باشد که در آن وقوع دو یا چند پیشامد کنترل پذیر امکان پذیر باشد، با وقوع هر کدام از این پیشامدها نهایتاً باید به حالت مشترکی در اتوماتان مذکور رسید.

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۲۰- کد LLD متناظر با کنترل کننده‌ی ناظر محلی SVC



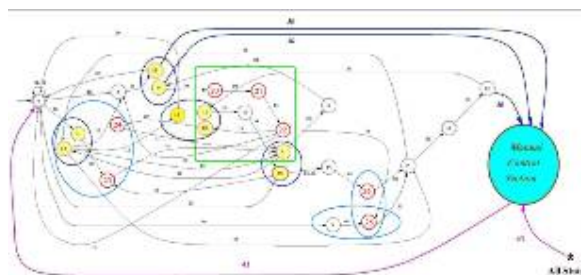
شکل ۲۱- دیاگرام زمانی سیگنال‌های ورودی و خروجی PLC

نتیجه گیری

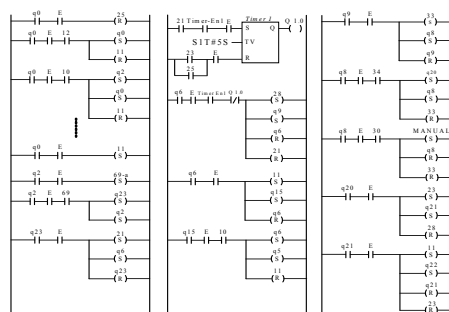
در این مقاله لزوم ایجاد هماهنگی بین دو مؤلفه اصلی کنترل ولتاژ در شبکه‌های قدرت یعنی SVC و ULTC، در تنظیم ولتاژ نقطه مورد نظر از یک شبکه قدرت در جهت بکار گرفتن پتانسیل موجود در تجهیزات تثبیت ولتاژ برای مواجهه سریع با تغییرات احتمالی ولتاژ در لحظات زمانی آینده مورد بحث قرار گرفت. با مدلسازی فرآیند مورد نظر در قالب یک سیستم گسسته پیشامد، با استفاده از نظریه کنترل نظارتی، بدون نیاز به در نظر گرفتن مسائلی از قبیل وجود تأخیر زمانی، و یا وجود نواحی مرده در مشخصه ULTC، و یا غیر خطی بودن فرآیند، کنترل کننده‌ای طراحی گردید که علاوه بر آنکه کنترل کامل رفتار ULTC را بر عهده خواهد داشت، قادر خواهد بود هماهنگی لازم بین SVC و ULTC را ایجاد نماید.

شکل ۱۸ اصلاح می‌گردد. با در نظر گرفتن کلیه مسائل مربوطه و با استفاده از یک الگوریتم مدون، کد دیاگرام نردبانی متناظر با این اتوماتن استخراج می‌شود که بخشی از آن در شکل ۱۹ ارائه شده است. بطور مشابه، کد دیاگرام نردبانی کنترل ناظر SVC نیز بصورت شکل ۲۰ بدست می‌آید.

با توجه به روش بکار گرفته شده جهت تبدیل اتوماتن کنترل کننده‌های ناظر محلی به کد دیاگرام نردبانی معادل آنها، کد دیاگرام نردبانی نهایی را می‌توان بدون نیاز به هیچ‌گونه اصلاحی مستقیماً بر روی حافظه‌ی PLC بارگذاری نمود. دیاگرام زمانی سیگنال‌های کارت‌های ورودی و خروجی PLC در طی یک سناریوی افت ولتاژ در شکل ۲۱ نشان داده شده است. با بررسی این دیاگرام‌های زمانی می‌توان مشاهده نمود که PLC به عنوان مجری بخش کنترل اتوماتیک کنترل نظارتی هماهنگ کننده SVC و ULTC، در مواقع مورد نیاز با صدور فرمان‌های لازم (سیگنال‌های 11, 33, 69, 81, 83, 85, 87, 89)، فرآیند را در مسیر صحیح و مطابق با مشخصات کنترلی در نظر گرفته شده هدایت می‌نماید.



شکل ۱۸ - اتوماتن اصلاح شده‌ی اولین کنترل کننده‌ی ناظر محلی



شکل ۱۹- قسمتی از کد LLD متناظر کنترل کننده‌ی ناظر ULTC

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

- [7] M. Noorbakhsh and A. Afzalian, "PLC Based Implementation of Supervisory Controller for Under Load Tap-Changer", *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Control, Automation and Systems*, Seoul, Korea, 2007
- [8] M. Noorbakhsh and A. Afzalian, "PLC Implementation of Decentralized Supervisory Control for Dynamic Flow Controller", 2008 IEEE Multi-conference on Systems and Control, September 3-5, 2008, Texas, USA
- [9] Noorbakhsh M, Afzalian A., "Implementation of Supervisory Control of DES Using PLC". Proc. of 15th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE'07), (In Persian), Tehran, Iran 2007.
- [10] J. Prosser, "Supervisory Control of Electric Power Transmission Networks", *IEEE Transaction on Power Systems*, 1995. 10(2): p. 1104-1110
- [11] S. Y. Lin, Y. C. Ho and C. I. H Lin, "An ordinal Optimization theory based algorithm for solving the optimal power flow problem with discrete control variables", *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004. 19(1): p. 267-286
- [12] W. M. Wonham, "Supervisory Control of Discrete- Event Systems", Department of Electrical and Computer Engineering, University of Toronto, 2009, available at <http://www.control.utoronto.ca/DES>
- [13] Paserba, J. J., Leonard, D. J., Miller, N.W., Naumann, S. T., Lauby, M. G. and Sener, F. P. "Coordination of a distribution level continuously controlled compensation device with existing substation equipment for long term var management," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 9, no. 2, Apr. 1994, pp. 1034-1040
- [14] Won Kim, G., Kwang, Lee, Y. "Cordination Control of ULTC Transformer and STATCOM Based on Artificial Neural Network, ," *IEEE Trans. Power Sys.*, vol. 20, no. 2, May. 2005, pp. 580-586
- [15] Fu, L., Pal, B, and Cory, B. "Voltage regulation for primary level power networks by virtual voltage coordinated control," *IEEE* 2006

با استفاده از نظریه کنترل نظارتی، بهینه بودن کنترل کننده هماهنگ کننده طراحی شده نیز گارانتی می‌شود. با توجه به اهمیت موضوع پیاده‌سازی عملی یک کنترل کننده ناظر گسسته پیشامد، مسائل و مشکلات مربوطه معرفی و دسته بندی گردید و به دنبال آن راه حل کلی استخراج کد متناظر با اتوماتن کنترل کننده های ناظر تشریح گردید و برای پیاده‌سازی سیستم کنترلی طراحی شده بر روی یک PLC بکار گرفته شد.

مراجع:

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, 1994
- [2] M. H. Abdel-Rahman, F. M. H. Youssef, and A. A. Saber, "New Static Var Compensator Control Strategy and Coordination With Under-Load Tap Changer", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21 (3), pp. 1630-1635, 2006
- [3] K. M. Son, K. S. Moon, S.K. Lee and J. K. Park, "Coordination of an SVC with a ULTC Reserving Compensation Margin for Emergency Control", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15 (4), pp. 1193-1198, 2000.
- [4] A. Afzalian, A. Saadatpoor, and W. M. Wonham, "Discrete-Event System Modeling and Supervisory Control for Under-load Tap-Changing Transformers", *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Control Applications*, Munich, Germany, October 4-6, 2006.
- [5] A. Afzalian. and W. M. Wonham, "Timed Discrete-Event System Supervisory Control for Under-Load Tap-Changing Transformers", *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Signal Proseing, Systems Modeling and Control*. p :85-90
- [6] A. Afzalian. and W. M. Wonham, "Discrete-Event System Supervisory Controller Design for an Electrical Power Transmission Network", *14th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE'06)*. Tehran

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

- [24] Leduc. R. J. and Wonham. W.M., "DISCRETE EVENT SYSTEMS MODELIN AND CONTROL OF A MANUFACTURING TESTBED", CCECEKCGEI '1996
- [25] Ramirez-Serrano. A. and Zhu. S.C. and Chan. S.K.H. and Chan. S.S.W. and Benhabib. B. (2000), "A Hybrid PC/PLC Architecture for Manufacturing System Control-Implementation", IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.3, 2000
- [16] EL-Sadej, M. Z. Dessouky, M. M. ,Mohamoud, G. A. and Rashed, W. I. "Enhancement of steady-state voltage stability by static VAR compensator," Electric Power System Research 43 (1997), pp.179-185
- [17] EL-Sadej, M. Z. Dessouky, M. M. ,Mohamoud, G. A. and Rashed, W. I. "Combined use of tap-changing transformer and static VAR compensator for enhancement of steady-state voltage stabilities," Electric Power System Research 45 (1998), pp.47-55
- [18] Abdel-Rahman, M. H. Youssef, F. M. H. and Saber, A. A. "New Static Var Compensator Control Strategy and Coordination With Under-Load Tap Changer", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 21 (3), , 2006, pp. 1630-1635
- [19] Son, K. M. Moon, K. S. Lee S.K. and Park, J. K. "Coordination of an SVC with a ULTC Reserving Compensation Margin for Emergency Control", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 15 (4), Octobe 2000, pp. 1193-1198
- [20] B. Otomega, V. Sermanson, and T. Van Cutsem, "Reverse-logic control of load tap changers in emergency voltage conditions", in *Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna*
- [21] Fabian, M. and Hellgren. A, "PLC-based Implementation of Supervisory Control for Discrete Event Systems", Proceedings of the 37th IEEE conference on Decision & Control, Tampa, Florida, USA, Dec. 1998
- [22] Hellgren. A. and Fabian. M. and Lennartson. B. "Synchronised Execution of Discrete Event Models Using Sequential Function Charts", Proceedings of the 38th Conference on Decision & Control, Phoenix, Arizona, Dec. 1999.
- [23] Hasdemir. I. T. and Kurtulan. S. and Geren. L, "Implementation of Local Modular Supervisory Control of a Penumatic System Usinf PLC" Copyright © 2004 IFAC.
-