

ارزیابی قابلیت اعتماد انواع SVC در سیستم‌های قدرت با استفاده از زنجیره‌ی مارکوف

علی بهدان^(۱) - بهادر فانی^(۲) - احسان ادیب^(۳)

(۱) کارشناس ارشد - گروه برق- قدرت، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، اصفهان، ایران

(۲) استادیار - گروه برق- قدرت، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، اصفهان، ایران

(۳) دانشیار - گروه الکترونیک، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۹/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۲۳

خلاصه: جبران‌کننده استاتیکی توان راکتیو (SVC) نقش مهمی را در قابلیت اعتماد سیستم قدرت ایفا می‌کند. در ارزیابی‌های قابلیت اطمینان، فقط توان راکتیو به عنوان قید شبکه در نظر گرفته می‌شود و در بررسی‌ها تأثیر SVC روی ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت هنوز در تکنیک‌های موجود در نظر گرفته نشده است. این مقاله انواع SVC یعنی TCR-FC، TSC و TCR-TSC را مورد بررسی قرار می‌دهد و اطلاعاتی از حالت‌های به خطا رفته و یا تعمیر اجزای آن‌ها به کاربر می‌دهد. در این مقاله ابتدا ساختار هر SVC بیان شده و یک به یک اجزای آن‌ها معرفی می‌شوند، سپس برای هر یک از SVCها بلوک دیاگرامی طراحی شده و همچنین برای هر جزء این SVCها یک ضریب خطا (λ) و یک ضریب تعمیر (μ) بیان می‌شود. بدین ترتیب واضح است که λ پارامتری است که بیانگر به خطا رفتن هر جزء می‌باشد و μ پارامتری است که بیانگر به تعمیر رفتن یا وارد مدار شدن همان جزء است. پس از طراحی بلوک دیاگرام به وسیله‌ی زنجیره‌ی مارکوف ضرایب تعمیر و خطای هر سه SVC مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت با انجام تحلیل حساسیت نشان داده می‌شود که کدام یک از اجزای هر SVC زودتر و کدام یک از اجزای هر SVC دیرتر به حالت خطا و تعمیر می‌رود.

کلمات کلیدی: جبران‌کننده توان راکتیو، قابلیت اعتماد، زنجیره‌ی مارکوف، توان راکتیو.

Reliability Evaluation of Power System SVC Types Using a Markov Chain

Ali Behdan⁽¹⁾ - Bahador Fani⁽²⁾ - Ehsan Adib⁽³⁾

(1) MSc – Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Esfahan, Iran

alibehdan@yahoo.com

(2) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Esfahan, Iran

bahador.fani@gmail.com

(3) Associate Professor - Department of Electrical Engineering, Esfahan University of Technology, Esfahan, Iran

adib.ehsan@gmail.com

Static reactive power compensator (SVC) plays an important role in power system reliability stems. In evaluations of reliability, only reactive power is considered as a constraint network is placed in the SVC BrsryHa impact on power system reliability evaluation techniques are still not considered. This type of SVC, the TCR-FC, TSC and TCR-TSC examined and the information wrong or repair parts of the states of the user. μ is expressed. This type of SVC, the TCR-FC, TSC and TCR-TSC examine the error occurs and information HaltHay or repair parts used by our participants. Static reactive power compensator (SVC) plays an important role in power system reliability stems. Thus it is clear that λ is a parameter that indicates the error to each component, and μ is a parameter which indicates the service or go into the same circuit components and repair goes wrong. After the static reactive power compensator (SVC) plays an important role in power system reliability.

Index Terms: Compensation of reactive power, reliability, Znjyryh Y Markov, reactive power.

نویسنده مسئول: علی بهدان، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، اصفهان، ایران، alibehdan@yahoo.com

۱- مقدمه

مقاله اطلاعاتی از اجزای هر SVC را بیان می‌کند و با استفاده از تحلیل حساسیت برای هر SVC حساس‌ترین جزء را در برابر نرخ‌های شکست و تعمیر نشان می‌دهد و به کاربران اطلاعاتی می‌دهد که در چه مواقعی از کدام SVC استفاده کنند.

ابتدا در بخش دوم انواع SVC نوع TCR-FC توصیف می‌شود زیرا SVC از نوع TCR-FC یک مدل متداول تر می‌باشد. سپس اجزای این SVC و عملکرد آن توصیف می‌شود. در ادامه با استفاده از پروسه‌ی مارکوف یک مدل سه حالته‌ی قابلیت اعتماد را برای این SVC پیشنهاد کرده و در نهایت یک تحلیل حساسیت روی نرخ‌های خرابی و تعمیر مؤلفه‌های SVC برای در نظر گرفتن اثر این پارامترها روی SVC انجام می‌شود. در نهایت انواع TSC و TCR-TCR به طور مشابه بررسی می‌شوند و همچنین تحلیل حساسیت روی نرخ‌های خرابی و تعمیر آن‌ها انجام می‌شود.

۲- جبران کننده‌ی استاتیکی توان راکتیو

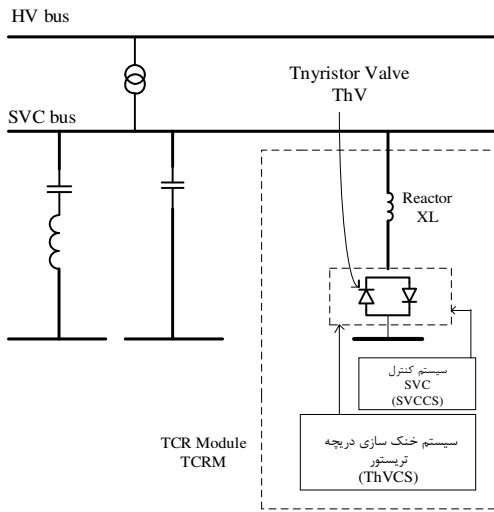
اگرچه SVCها از انواع مختلفی مثل TSC و TCR-FC و TCR-TSC وجود دارد، اما اجزای قابل کنترل در اکثر آن‌ها مشابه است [۹]. SVCها معمولاً شامل اجزای قابل کنترل همچون راکتور کنترل شده با تریستور (TCR^2)، TSC^۳ (خازن سوئیچ شونده با تریستور)، FC^۴ (خازن‌های ثابت) و فیلترهای AC می‌باشند. راکتور کنترل شده با تریستور (TCR) از یک راکتور ثابت تشکیل شده است که به صورت سری با سوئیچ‌های تریستوری پشت به پشت قرار دارد. TCR می‌تواند به طور پیوسته توان راکتیو را با استفاده از تغییر دامنه جریان از طریق راکتور کنترل کند. همچنین خازن ثابت توان راکتیو خازنی را در شبکه تأمین می‌کند. TSC نیز به طور مشابه شامل خازنی است که به طور سری با سوئیچ‌های تریستوری پشت به پشت و راکتور میرا کننده قرار گرفته است [۱۰]. بنابراین با استفاده از چندین TSC در یک SVC کنترل توان راکتیو می‌تواند در پله‌هایی با تغییر پی‌درپی خازن‌ها داخل و خارج شونده انجام شود. به عبارت دیگر در فرکانس قدرت فیلترهای AC خازنی می‌باشد و توان راکتیوی در حدود ۱۰٪ تا ۳۰٪ توان نامی TCR بر حسب MVAR تولید می‌کنند. در حالی که AC^۵ها جریان هارمونیک تولید شده به وسیله‌ی TCR را نیز جذب می‌کنند. چند ساختار از SVC وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها یکی ساختار TCR و FC و ساختار TSC و TCR یا ساختار TSC است. TCR-FC یکی از انواع مهم SVC است. بنابراین ابتدا از این طرح برای مدل‌سازی SVC در این مقاله استفاده شده است و مدل‌سازی‌ها روی این ساختار انجام گرفته است. یک دیاگرام تک خطی SVC از نوع TCR-FC در شکل (۱) نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۱) دیده می‌شود شش جزء اصلی SVC عبارتند از:

خازن ثابت: بانک‌های خازن ثابت می‌توانند توان راکتیو خازنی کافی را برای شبکه‌ی قدرت الکتریکی تأمین نمایند.
فیلتر: فیلتر AC از خازن‌ها، راکتورها و مقاومت‌ها ساخته شده است و

با گسترش صنعت برق، جبران کننده‌های توان راکتیو استاتیکی (SVC^۱) بیشتری برای دست یافتن به انعطاف پذیری بهتر به کار می‌روند [۱]. این جبران کننده‌ها برای کاهش تلفات توان، بهبود پروفیل ولتاژ، حل مشکلات ناپایداری ولتاژ و افزایش حداکثر توان انتقالی در خطوط انتقال استفاده می‌شوند [۲،۳]. در واقع نقش اصلی SVC تنظیم مقدار جبران توان راکتیو برای برطرف نمودن نیاز سیستم‌های قدرت الکتریکی واقعی است. به علاوه طی اکثر پیشامدها، مؤلفه‌ی توان راکتیو خط باردار به طور قابل توجهی بیشتر از توان راکتیو بار تغییر می‌کند [۴]. بنابراین SVC اثر قابل توجهی روی پایداری سیستم در طی پیشامدها دارد و باید در قابلیت اعتماد سیستم‌های قدرت در نظر گرفته شود [۵]. اما اکثر الگوریتم‌های موجود در ارزیابی قابلیت اطمینان، توان راکتیو را به علت استفاده از پخش بار DC در نظر نمی‌گیرند [۶]. توجه به سه نکته اساسی در سیستم‌های قدرت الکتریکی واقعی حائز اهمیت است. اول اینکه همه‌ی بارهای شبکه مقاومتی نیستند. دوم اینکه خطوط انتقال در شبکه باعث برخی محدودیت‌ها در توان انتقالی می‌شود. سوم اینکه ارتباط بین خروجی توان اکتیو و راکتیو در یک ژنراتور توسط یک نمودار P-Q تعیین می‌شود. در نتیجه مسایلی فوق در ارزیابی قابلیت اعتماد با به کارگیری تحلیل‌های پخش بار AC باید در نظر گرفته شود [۷].

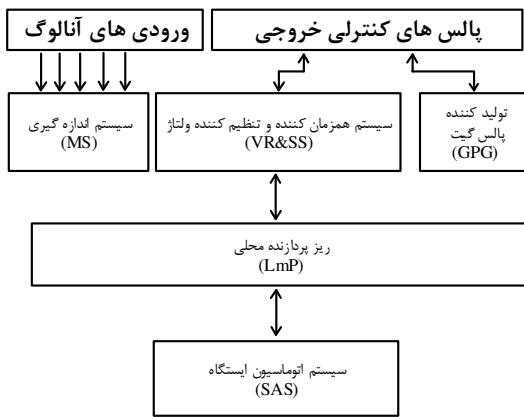
در مرجع [۷] اهمیت استفاده از خازن‌های شنت به منظور بهبود قابلیت اعتماد سیستم توزیع انرژی الکتریکی ثابت شده است. در این مقاله با استفاده از مثال‌های عددی شاخص‌های قابلیت اعتماد برای سیستم توزیع با خازن شنت و بدون آن محاسبه شده است. همچنین در این مقاله نشان داده شده که قابلیت اعتماد با استفاده از خازن‌های شنت بهبود می‌یابد. به علاوه اثر خازن‌های شنت یا سایر منابع توان راکتیو روی سیستم قدرت مرکب در این مرجع در نظر گرفته شده و اثر قابل توجه منابع توان راکتیو روی ارزیابی سیستم مرکب نشان داده شده است. برخی شاخص‌های جدید قابلیت اعتماد برای ارائه‌ی اثر کمبود توان راکتیو روی قابلیت اعتماد سیستم معرفی شده‌اند.

در مرجع [۷] همچنین شاخص‌های قابلیت اعتماد مرتبط با اثر کمبود تولید توان راکتیو معرفی شده و از آنهایی که بر اثر کمبود توان اکتیو می‌باشند تفکیک شده‌اند. الگوریتم ارائه شده در این مقاله برای ارزیابی سیستم‌های قدرتی که توان راکتیو آنها بر اثر از دست رفتن منابع ذخیره‌ی توان راکتیو مانند ژنراتورها، کندانسورهای سنکرون و جبران کننده‌ها کم می‌شود، مناسب است. از آنجایی که تمرکز تحقیق تعریف شاخص‌های جدید است، لذا منابع توان راکتیو را با یک مدل دو حالته ساده‌ی Up-Down مدل‌سازی شده‌اند. در مرجع [۸] قابلیت اعتماد یک SVC که از نوع TCR-FC می‌باشد بررسی شده است. در این مرجع برخی شاخص‌های جدید قابلیت اعتماد برای یک SVC بیان شده است. اما در این مقاله با استفاده از فرآیند مارکوف قابلیت اعتماد سه نوع SVC یعنی TSC، TCR-FC و TCR-TSC بررسی می‌شود. این



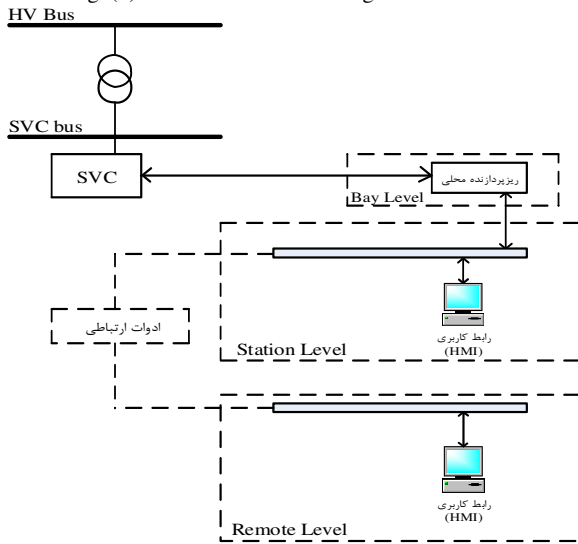
شکل (۱): طرح کلی نوع SVC TCR-FC

Fig. (1): The schematic of general TCR-FC type SVC



شکل (۲): بلوک دیاگرام SVCCS

Fig. (2): The hardware block diagram of SVCCS



شکل (۳): طرح کلی موقعیت یک SVC در یک SAS [۶]

Fig. (3): The schematic position of a typical SVC in a SAS [6]

تأمین کننده‌ی توان راکتیو خازنی برای کل سیستم و حذف کننده‌ی هارمونیک‌های تولید شده توسط TCR می‌باشد.

راکتور (XL): راکتوری با هسته هوایی در SVC است که پایداری بالایی دارد و کاملاً خطی است. این راکتور برای جذب توان راکتیو با کنترل تریستورها استفاده می‌شود. معمولاً راکتور هسته هوایی به صورت سری با تریستورها با اتصال مثلث متصل شده است و سپس به ثانویه‌ی ترانسفورماتور تزویج متصل می‌شود.

سوئیچ‌های تریستوری (THV)^۷: سوئیچ‌های تریستوری قسمت اصلی کنترل در یک سیستم SVC است. این سوئیچ‌ها ترکیب چندین تریستور متصل شده به صورت سری و موازی و اجزای کمکی آن است. تریستورها به وسیله‌ی سیستم روشنایی الکتریکی راه‌اندازی می‌شوند و خنک‌سازی آبی به عنوان روش اصلی خنک‌سازی اتخاذ می‌شود.

سیستم خنک‌سازی سوئیچ‌های تریستوری (THVCS)^۸: هدف این سیستم خنک‌سازی و رفع گرمای تولیدی توسط سوئیچ‌های تریستوری است و معمولاً دو نوع سیستم خنک‌کننده وجود دارند، سیستم‌های خنک‌کننده آبی و هوایی.

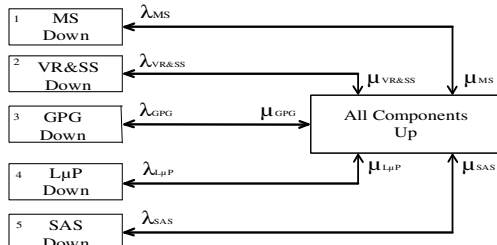
سیستم کنترل SVC (SVCCS)^۹: این جزء قسمت هوشمند SVC است که مسئول کنترل پالس‌های سوئیچ‌های تریستور در زمان مناسب برای روشن کردن آن‌ها است. همان طور که در شکل (۱) توضیح داده شده XL و THV و THVCS و SVCCS چهار جزء اصلی هستند. TCRM^{۱۰} قسمتی از SVC است که از طریق راکتور توان راکتیو تولید می‌کند و SVCCS ترکیب پنج جزء مختلف است و بلوک دیاگرام سخت افزار SVCCS در شکل (۲) نشان داده شده است.

سیستم اندازه‌گیری اولین جزئی است که ورودی‌های ضروری را برای کنترل کننده‌ی SVC فراهم می‌کند. ورودی‌های مختلف مورد نیاز یک SVC بستگی به عملکردی دارد که هدف کنترل کننده‌ی SVC است [۱۰]. ممکن است شامل PT یا CT یا هر دو برای اندازه‌گیری جریان خط، جریان بار و ولتاژ باشد. اندازه‌گیری‌های آنالوگ جریان و ولتاژ ورودی اغلب دارای نویزند که با یک فیلتر پایین‌گذر رفع می‌گردند. سپس مبدل A/D از سیگنال آنالوگ به شکل دیجیتال نمونه‌برداری می‌کند [۱۰]. در جزء دوم، تنظیم‌کننده‌ی ولتاژ و سیستم سنکرون کننده (VR&SS)^{۱۱} اندازه‌ی ولتاژ اندازه‌گیری شده را با ولتاژ مرجع مقایسه می‌کند. خطای حاصل از یک کنترل کننده‌ی PI عبور داده می‌شود و سوسپتانس اولیه به دست می‌آید. به علاوه، این جزء به عنوان یک سیستم سنکرون کننده از PLL سنکرون شده با ولتاژهای ثانویه‌ی خط به خط و یک پالس ژنراتور که پالس‌های مناسب برای ۲۴ تریستور را ارسال می‌کند، استفاده می‌کند (شش تریستور توسط سه فاز متراکم) [۱۱]. سپس گیت پالس ژنراتور (GPG)^{۱۲} پالس‌های کنترلی تولید شده را به وسیله‌ی VR&SS برای پالس‌های الکتریکی برای راه‌اندازی سوئیچ‌های تریستوری مناسب در زمان مناسب تبدیل می‌کند. پردازشگر محلی (LmP)^{۱۳} یک جزء ضروری در پروسه‌ی کنترل است. وظیفه‌ی این ریز پردازنده انجام محاسبات لازم در این پروسه کنترل می‌باشد.

$$\lambda_{SVCCS} = \lambda_{MS} + \lambda_{VR\&SS} + \lambda_{GPG} + \lambda_{LHP} + \lambda_{SAS} \quad (3)$$

$$\mu_{SVCCS} = (\lambda_{MS} + \lambda_{VR\&SS} + \lambda_{GPG} + \lambda_{LHP} + \lambda_{SAS})^{-1} \left(\frac{\lambda_{MS}}{\mu_{MS}} + \frac{\lambda_{VR\&SS}}{\mu_{VR\&SS}} + \frac{\lambda_{GPG}}{\mu_{GPG}} + \frac{\lambda_{LHP}}{\mu_{LHP}} + \frac{\lambda_{SAS}}{\mu_{SAS}} \right) \quad (4)$$

حالت ۱ تا ۵ مدل مارکوف می‌توانند با هم در یک حالت Down ادغام شوند، زیرا ممکن است همه خرابی SVCCS را نتیجه دهند. شکل (۵) مدل دو حالت نتیجه شده از ساده‌سازی را نشان می‌دهد و پارامترهای این مدل معادل بر اساس مرجع [۱۴] به دست آمده‌اند.



شکل (۴): ارائه فضای حالت SVCCS

Fig. (4): The state space representation of SVCCS [6]



شکل (۵): مدل مارکوف دو حالتی SVCCS

Fig. (5): Two state Markov model of SVCCS

۲-۳- مدل کردن قابلیت اطمینان SVC نوع TCR-FC

فضای حالت SVC نوع TCR-FC با مدل مارکوف در شکل (۶) نشان داده شده است. اگر همهی ۶ جزء صحیح کار کنند، SVC می‌تواند کار کند. در غیر این صورت اگر ACF دچار خطا شود، SVC ممکن است در حالت غیر مجاز اولیه باشد. در حالت دوم خرابی FC را نتیجه می‌دهد و سوم وقتی اتفاق می‌افتد که TCRM از سرویس خارج شود. در واقع اگر یکی از مؤلفه‌های TCRM (XL و THV و THVCS یا SVCCS) دچار مشکل شود، TCRM به خرابی می‌رود و این نشان می‌دهد که این ۴ جزء از منظر قابلیت اعتماد سری هستند. در گام بعدی اگر ACF و FC با هم معیوب شوند، سیستم ممکن است در حالت غیر مجاز جلو برود و اگر ACF یا FC با TCRM معیوب شوند، سیستم به ترتیب به حالت غیر مجاز ۵ یا ۶ می‌رود. پارامترهای این مدل به شرح زیر هستند:

$$\lambda_{DR1} = \lambda_{ACF} \quad (5)$$

$$\mu_{DR1} = \mu_{ACF} \quad (6)$$

$$\lambda_{DR2} = \lambda_{FC} \quad (7)$$

$$\mu_{DR2} = \mu_{FC} \quad (8)$$

$$\lambda_{DR3} = \lambda_{XL} + \lambda_{THV} + \lambda_{THVCS} + \lambda_{SVCCS} \quad (9)$$

$$\mu_{DR3} = (\lambda_{XL} + \lambda_{THV} + \lambda_{THVCS} + \lambda_{SVCCS})^{-1} \left(\frac{\lambda_{XL}}{\mu_{XL}} + \frac{\lambda_{THV}}{\mu_{THV}} + \frac{\lambda_{THVCS}}{\mu_{THVCS}} + \frac{\lambda_{SVCCS}}{\mu_{SVCCS}} \right) \quad (10)$$

آخرین جزء سیستم اتوماسیون فرعی (SAS)^{۱۴} است. شکل (۳) رابطه‌ی یک SVC با یک SAS را نشان می‌دهد. یک SAS شامل مجموعه‌ای از اجزا و سطوح مختلف است. اجزای اصلی یک SAS رابط ماشین و انسان (HMI)^{۱۵}، کامپیوترهای شخصی صنعتی (IPC)^{۱۶} و سرور مرکز کنترل شبکه (NCC)^{۱۷} و IED^{۱۸} های فرعی مختلف، دهانه‌ی واحد کنترل (BCU)^{۱۹}، واحد منبع ذخیره (PSU)^{۲۰} و برخی امکانات ارتباطی هستند [۱۲]. در این ساختار فقط ارتباط بین HMI ها و یک SVC نشان داده شده است. به علاوه یک SAS نوعی شامل سه سطح سلسه مراتبی (HL^{۲۱}ها) شامل سطح کنترل از راه دور (HL1)، سطح کنترل فرعی (HL2) و سطح کنترل دهانه (HL3) است [۱۲]. هر یک از این سطوح برخی وظایف در کنترل تجهیزات مختلف را بر عهده دارند. HMI که در سطح فرعی است برای تنظیم پارامترهای کنترلی داخلی مانند ولتاژ مرجع استفاده می‌شود. اما اگر چندین SVC در شبکه وجود داشته باشد، سطح کنترل از راه دور انتخابی که به SAS از طریق یک وسیله‌ی ارتباطی مثل GPS، فیبر نوری و وسایل ارتباطی بی‌سیم متصل شده، برای هماهنگی آنها لازم است.

۲-۱- مدل سازی قابلیت اطمینان SVC

دو فرض لازم برای مدل کردن قابلیت اعتماد SVC مبتنی بر روش مارکوف وجود دارد که عبارتند از: همه مؤلفه‌ها غیر تکراری باشند.

هر مؤلفه دو حالت عملکرد Up-Down داشته باشد.

برای بسط یک مدل قابلیت اطمینان برای SVC در ابتدا بسط یک مدل برای SVCCS ضروری است.

۲-۲- مدل کردن قابلیت اطمینان SVCCS

سیستم کنترل SVC شامل ۵ جزء است و هر یک از این اجزاء از یکدیگر مستقل می‌باشند. به عبارت دیگر وقتی این سیستم کنترل در حالت خرابی است، خرابی مؤلفه‌ی بعدی نمی‌تواند رخ دهد تا اینکه SVCCS به حالت عملکردش باز گردد. اگر یکی از اجزا خراب شود کل سیستم ممکن است از دست برود. این به این معناست که از منظر قابلیت اعتماد با هم سری هستند. شکل (۴) معرفی فضای حالت این مدل را نشان می‌دهد. حالت صفر حالتی است که همه اجزاء درست کار می‌کنند و بقیه‌ی حالات معرف ۵ احتمال مختلف (بر پایه فرض‌ها) در خرابی اجزاء هستند. روش تشریح شده در مرجع [۱۳] برای تحلیل از حالت ماندگار سیستم استفاده کرده است.

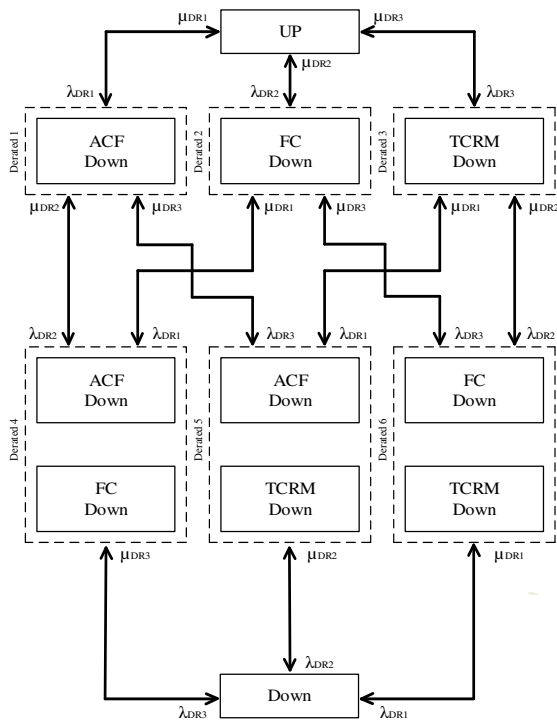
$$P_{SACCS,UP} = \left(1 + \frac{\lambda_{MS}}{\mu_{MS}} + \frac{\lambda_{VR\&SS}}{\mu_{VR\&SS}} + \frac{\lambda_{GPG}}{\mu_{GPG}} + \frac{\lambda_{LHP}}{\mu_{LHP}} + \frac{\lambda_{SAS}}{\mu_{SAS}} \right)^{-1} \quad (1)$$

$$P_{SVCCS,DN} = \frac{\left(\frac{\lambda_{MS}}{\mu_{MS}} + \frac{\lambda_{VR\&SS}}{\mu_{VR\&SS}} + \frac{\lambda_{GPG}}{\mu_{GPG}} + \frac{\lambda_{LHP}}{\mu_{LHP}} + \frac{\lambda_{SAS}}{\mu_{SAS}} \right)}{\left(1 + \frac{\lambda_{MS}}{\mu_{MS}} + \frac{\lambda_{VR\&SS}}{\mu_{VR\&SS}} + \frac{\lambda_{GPG}}{\mu_{GPG}} + \frac{\lambda_{LHP}}{\mu_{LHP}} + \frac{\lambda_{SAS}}{\mu_{SAS}} \right)^{-1}} \quad (2)$$

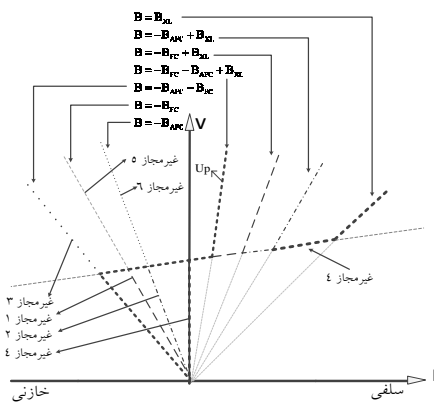
۲-۴- تحلیل حساسیت

۲-۴-۱- حساسیت SVCCS در برابر نرخهای شکست و تعمیر اجزاء

همانطور که در بخش قبل ذکر شد SVCCS ۵ جزء دارد. بنابراین با استفاده از شاخص λ/μ تحلیل اثر هر جزء روی SVCCS ممکن می‌شود. جزء با بیشترین مقدار شاخص λ/μ همان است که اپراتورهای سیستم برای کاهش نرخ خطا یا افزایش نرخ تعمیر نیاز دارد. بنابراین می‌توانند سیستم را بهبود ببخشند. جدول (۷) اندازه‌ی شاخص را برای همه‌ی اجزای SVCCS نشان می‌دهد. از بین اجزای GPG پایین‌ترین و SAS بیشترین مقدار را دارند. بنابراین SAS جزئی است که باید با کاهش نرخ خطا یا افزایش نرخ تعمیر بهبود یابد.



شکل (۶): مدل مارکوف نوع SVC TCR-FC
Fig. (6): The Markov model of TCR-FC type SVC [6]



شکل (۷): مشخصه ولتاژ-جریان هفت حالت مختلف
Fig. (7): Voltage-current characteristics of 7 different states

حالت غیر مجاز اول معرف موردی است که ACF از سرویس خارج شده است. اما FC و کل متغیر توان راکتیو تولیدی سیستم (TCRM) در سرویس است. بنابراین سیستم هنوز می‌تواند توان راکتیو تولید کند اما نه در محدوده‌ی قبلی. حالات غیرمجاز دوم و چهارم به دلیل خرابی FC و به طور همزمان FC با ACF وضعیت یکسان اما با محدوده‌های مختلف دارند. در حالات ۳ و ۵ و ۶ TCRM از سرویس خارج شده است و مشخصه‌ی باقی مانده‌ی سیستم شبیه یک خازن است. شکل ۷ مشخصه‌ی ولتاژ-جریان ۶ حالت غیر مجاز و یک حالت UP مدل را نشان داده است. با ادغام ۶ حالت غیر مجاز در شکل (۸) فضای نتیجه شده که یک مدل ۳ حالت معادل است در شکل (۷) نشان داده شده است. بر پایه‌ی روش مرجع [۱۴]، احتمالات هر حالت در روش حالت ماندگار به شرح زیر است:

$$P_{SVC,UP} = (\mu_{DR1}\mu_{DR2}\mu_{DR3})^{-1} (\lambda_{DR1}\lambda_{DR2} + \mu_{DR1}\mu_{DR2}\mu_{DR3} + \lambda_{DR1}\mu_{DR2}\mu_{DR3} + \mu_{DR1}\lambda_{DR2}\mu_{DR3} + \mu_{DR1}\mu_{DR2}\lambda_{DR3} + \lambda_{DR1}\mu_{DR2}\lambda_{DR3} + \lambda_{DR1}\lambda_{DR2}\mu_{DR3})^{-1} \quad (11)$$

$$P_{SVC,DR} = (\lambda_{DR1}\mu_{DR2}\mu_{DR3} + \mu_{DR1}\lambda_{DR2}\mu_{DR3} + \mu_{DR1}\mu_{DR2}\lambda_{DR3} + \mu_{DR1}\lambda_{DR2}\lambda_{DR3} + \lambda_{DR1}\mu_{DR2}\lambda_{DR3} + \lambda_{DR1}\lambda_{DR2}\mu_{DR3} + \mu_{DR1}\mu_{DR2}\mu_{DR3})^{-1} \quad (12)$$

$$P_{SVC,DN} = (\lambda_{DR1}\lambda_{DR2}\lambda_{DR3})^{-1} (\lambda_{DR1}\lambda_{DR2}\lambda_{DR3} + \mu_{DR1}\mu_{DR2}\mu_{DR3} + \lambda_{DR1}\mu_{DR2}\mu_{DR3} + \mu_{DR1}\lambda_{DR2}\mu_{DR3} + \mu_{DR1}\mu_{DR2}\lambda_{DR3} + \lambda_{DR1}\lambda_{DR2}\mu_{DR3} + \lambda_{DR1}\mu_{DR2}\lambda_{DR3})^{-1} \quad (13)$$

پارامترهای مدل ۳ حالتی معادل به شرح زیر می‌باشند:

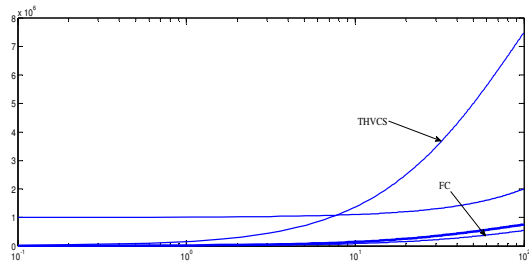
$$\lambda_{DR} = \lambda_{DR1} + \lambda_{DR2} + \lambda_{DR3} \quad (14)$$

$$\mu_{DR} = (\lambda_{DR1} + \lambda_{DR2} + \lambda_{DR3})^{-1} (\frac{\lambda_{DR1}}{\mu_{DR1}} + \frac{\lambda_{DR2}}{\mu_{DR2}} + \frac{\lambda_{DR3}}{\mu_{DR3}} + \frac{\lambda_{DR1}\lambda_{DR2}}{\mu_{DR1}\mu_{DR2}} + \frac{\lambda_{DR2}\lambda_{DR3}}{\mu_{DR2}\mu_{DR3}} + \frac{\lambda_{DR1}\lambda_{DR3}}{\mu_{DR1}\mu_{DR3}}) \quad (15)$$

$$\lambda_{DN} = (\lambda_{DR1} + \lambda_{DR2} + \lambda_{DR3}) \quad (16)$$

$$\mu_{DN} = (\lambda_{DR1} + \lambda_{DR2} + \lambda_{DR3})^{-1} (\frac{\lambda_{DR1}}{\mu_{DR1}} + \frac{\lambda_{DR2}}{\mu_{DR2}} + \frac{\lambda_{DR3}}{\mu_{DR3}} + \frac{\lambda_{DR1}\lambda_{DR2}}{\mu_{DR1}\mu_{DR2}} + \frac{\lambda_{DR2}\lambda_{DR3}}{\mu_{DR2}\mu_{DR3}} + \frac{\lambda_{DR1}\lambda_{DR3}}{\mu_{DR1}\mu_{DR3}}) \quad (17)$$

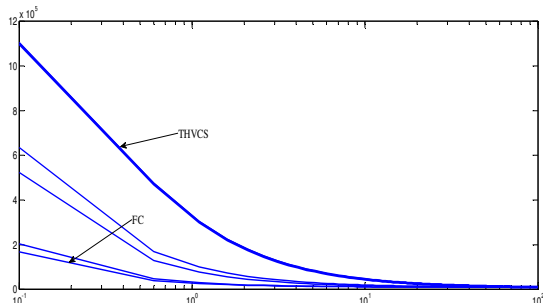
تخمین حساسیت هر حالت در ارزیابی مدل مارکوف SVC برای متغیرهای داده‌های ورودی یک گام مهم در تحلیل مدل است. جدول ۱ داده‌های عددی استخراج شده از مراجع [۱۵ و ۱۶] را نشان می‌دهد. این جدول نرخ خرابی و تعمیر اجزای SVC را نشان می‌دهد. در این بخش ابتدا تحلیل حساسیت SVCCS در برابر نرخهای شکست و تعمیر اجزاء انجام می‌شود، سپس احتمال حالات مؤلفه‌ها روی حالات بالا و غیر مجاز SVC مطالعه می‌شود.



شکل (۹): ضرایب نرخ خرابی اصلی

اثر نرخ خرابی اجزاء بر احتمال حالت غیرمجاز TCR-FC

Fig. (9): Effect of the components failure rate on TCR-FC type SVC derated state probability



شکل (۱۰): ضرایب نرخ تعمیر اصلی

اثر نرخ تعمیر اجزاء بر احتمال حالت غیرمجاز TCR-FC

Fig. (10): Effect of the components repair rate on TCR-FC type SVC derated state probability

۳- مدل سازی قابلیت اطمینان SVC نوع TSC

همان طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌کنید این SVC دارای خازن، سوئیچ‌های تریستوری و سیستم کنترل می‌باشد. هم‌چنین فضای حالت SVC نوع TSC با مدل مارکوف در شکل (۱۲) نشان داده شده است. در این مدل هر جزء SVC فقط به تنهایی به خطا می‌رود، یعنی اگر بیش از یک جزء به خطا برود SVC به حالت Down می‌رود، یعنی از مدار خارج می‌شود. حال مانند بخش قبل ضرایب خطا و تعمیر این SVC را می‌نویسیم که عبارتند از:

$$\lambda_{DR1} = \lambda_F \quad (18)$$

$$\lambda_{DR2} = \lambda_{ThV} \quad (19)$$

$$\lambda_{DR3} = \lambda_{ThVCS} \quad (20)$$

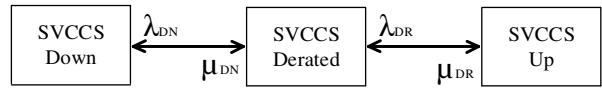
$$\lambda_{DR4} = \lambda_{svccs} \quad (21)$$

$$\mu_{DR1} = \mu_F \quad (22)$$

$$\mu_{DR2} = \mu_{ThV} \quad (23)$$

$$\mu_{DR3} = \mu_{ThVCS} \quad (24)$$

$$\mu_{DR4} = \mu_{svccs} \quad (25)$$



شکل (۸): مدل مارکوف سه حالت TCR-FC

Fig. (8): The equivalent three state Markov model of TCR-FC

۲-۴-۲- حساسیت SVC در برابر نرخ‌های شکست و تعمیر اجزاء
 SVC مانند بخش قبل ۶ جزء دارد. همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود شاخص λ/μ برای تحلیل اثر اجزای SVC استفاده شده است. THVCS بزرگترین و FC کوچکترین مقدار را برای این شاخص دارد. پس THVCS از نظر اپراتور قابل توجه است.

۲-۴-۳- حساسیت احتمالی حالات غیر مجاز SVC در برابر نرخ‌های تعمیر و خرابی اجزاء

برای تحلیل حساسیت احتمالی حالت غیر مجاز SVC عوض کردن نرخ‌های تعمیر و شکست هر جزء در حالی که بقیه ثابت‌اند ضروری است. این بدان معنی است که برای هر جزء همه نرخ‌های شکست و تعمیر اجزاء در ضریبی ضرب می‌شوند و اثرشان روی احتمال حالات غیرمجاز تحلیل می‌شود. نتایج در شکل (۹) و (۱۰) نشان داده شده است.

همان طور که در شکل (۹) می‌بینید تغییر نرخ خرابی THVCS بالاترین اثر را روی احتمال حالت غیر مجاز SVC دارد و FC کمترین اثر را دارد. شکل (۱۰) نشان می‌دهد که نرخ تعمیر FC پایین‌ترین اثر و نرخ تعمیر THVCS بیشترین اثر را روی احتمال حالات غیر مجاز SVC دارد.

Table (1): Components reliability data

جدول (۱): داده‌های قابلیت اعتماد اجزاء

اجزاء	(نرخ خرابی در سال) λ	(نرخ تعمیر در سال) μ
MS	0.2	438
VR&SS	0.02	54.75
GPG	0.0003925	54.75
L μ P	0.018252	52.14
SAS	0.03673	61.18
ACF	0.0522050	100
FC	0.0117275	100
C	0.0117280	100
XL	0.0152550	100
ThV	0.0722050	100
ThVCS	0.2699550	100

Table (2): SVCCS components μ/λ indices

جدول (۲): شاخص‌های λ/μ اجزاء SVCCS

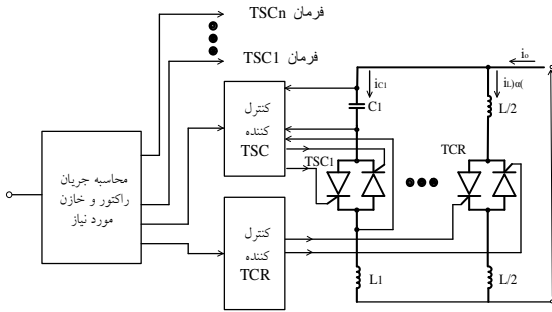
اجزاء	MS	VR&SS	GPG	L μ P	SAS	μ/λ
	4/56e-4	3/56e-4	7/17e-6	3/50e-4	6/00e-4	

Table (3): SVC components μ/λ indices

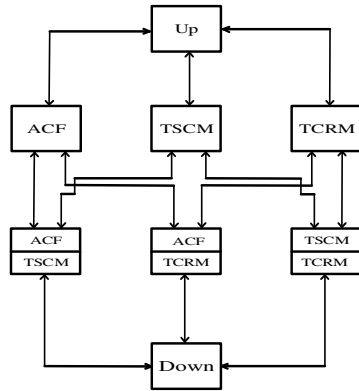
جدول (۳): شاخص‌های λ/μ اجزای SVC

اجزاء	FC	AFC	ThV	ThVCS	SVCCS	XL	μ/λ
	1/17e-4	5/22e-4	7/22e-4	2/70e-3	1/80e-3	1/53e-4	

$$P_{SVC,DR} = (\lambda_{DR1}\mu_{DR2}\mu_{DR3} + \mu_{DR1}\lambda_{DR2}\mu_{DR3} + \mu_{DR1}\mu_{DR2}\lambda_{DR3} + \mu_{DR1}\lambda_{DR2}\lambda_{DR3} + \lambda_{DR1}\mu_{DR2}\lambda_{DR3} + \lambda_{DR1}\lambda_{DR2}\mu_{DR3} + \lambda_{DR1}\lambda_{DR2}\lambda_{DR3} + \mu_{DR1}\mu_{DR2}\mu_{DR3})^{-1} \quad (35)$$



شکل (۱۵): طرح کلی نوع SVC TCR-TSC
Fig. (15): Basic diagram of SVC type TCR-TSC



شکل (۱۶): مدل مارکوف نوع SVC TCR-TSC
Fig. (16): The Markov model of SVC type TCR-TSC

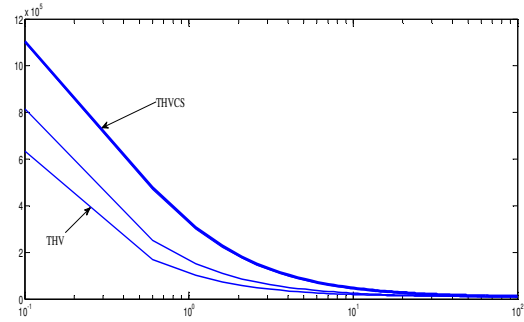
احتمال حالات Up و Down هم به طور مشابه عبارتند از:

$$P_{SVC,UP} = (\mu_{DR1}\mu_{DR2}\mu_{DR3} + \lambda_{DR1}\lambda_{DR2} + \mu_{DR1}\mu_{DR2}\mu_{DR3} + \lambda_{DR1}\mu_{DR2}\mu_{DR3} + \mu_{DR1}\lambda_{DR2}\mu_{DR3} + \mu_{DR1}\mu_{DR2}\lambda_{DR3} + \mu_{DR1}\lambda_{DR2}\lambda_{DR3} + \lambda_{DR1}\mu_{DR2}\lambda_{DR3} + \lambda_{DR1}\lambda_{DR2}\mu_{DR3})^{-1} \quad (36)$$

$$P_{SVC,DN} = (\lambda_{DR1}\lambda_{DR2}\lambda_{DR3} + \mu_{DR1}\mu_{DR2}\mu_{DR3} + \lambda_{DR1}\mu_{DR2}\mu_{DR3} + \mu_{DR1}\lambda_{DR2}\mu_{DR3} + \mu_{DR1}\mu_{DR2}\lambda_{DR3} + \mu_{DR1}\lambda_{DR2}\lambda_{DR3} + \lambda_{DR1}\mu_{DR2}\lambda_{DR3} + \lambda_{DR1}\lambda_{DR2}\mu_{DR3})^{-1} \quad (37)$$

۴-۱- تحلیل حساسیت

تخمین حساسیت هر حالت در مدل مارکوف SVC برای متغیرها در داده‌های ورودی یک گام مهم در تحلیل مدل می‌باشد. با توجه به داده‌های جدول (۱) احتمال حالات غیرمجاز این SVC را برای ضرایب خطا و تعمیر می‌یابیم.



شکل (۱۴): ضرایب نرخ تعمیر اصلی
اثر نرخ تعمیر اجزاء بر احتمال حالت غیرمجاز TSC
Fig. (14): Effect of the components repair rate on TSC type SVC derated state probability

۴- مدل سازی قابلیت اطمینان نوع SVC TCR-TSC

همان‌طور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌کنید این SVC دارای خازن، راکتور، سوئیچ‌های تریستوری و دو سیستم کنترل می‌باشد. همچنین فضای حالت نوع SVC TCR-TSC با مدل مارکوف در شکل (۱۶) نشان داده شده است. در این مدل ۲ سیستم کنترلی داریم، یعنی TSC و TCRM که یکی مربوط به TCR و دیگری مربوط به TSC است. در مجموع این مدل را با توجه به مدل مارکوف دارای ۳ جزء می‌دانیم. یکی همان فیلتر AC، دیگری TCRM یا بخش کنترلی TCR و دیگری TSCM یا بخش کنترلی TSC. در این مدل هر حالت غیر مجاز SVC به تنهایی اتفاق می‌افتد و اگر بیش از یک حالت غیر مجاز اتفاق بیفتد، SVC به طور کلی به حالت Down می‌رود. حال مانند بخش قبل ضرایب خطا و تعمیر این SVC را می‌نویسیم که عبارتند از:

$$\lambda_{DR1} = \lambda_{ACF} \quad (29)$$

$$\mu_{DR1} = \mu_{ACF} \quad (30)$$

$$\lambda_{DR2(TSC)} = \lambda_C \lambda_{ThV} \lambda_{ThVCS} \lambda_{SVCCS} \quad (31)$$

$$\mu_{DR2(TSC)} = (\lambda_C + \lambda_{ThV} + \lambda_{ThVCS} + \lambda_{SVCCS}) \left(\frac{\lambda_C}{\mu_C} + \frac{\lambda_{ThV}}{\mu_{ThV}} + \frac{\lambda_{ThVCS}}{\mu_{ThVCS}} + \frac{\lambda_{SVCCS}}{\mu_{SVCCS}} \right)^{-1} \quad (32)$$

$$\lambda_{DR2(TCR)} = \lambda_{XL} + \lambda_{ThV} + \lambda_{ThVCS} + \lambda_{SVCCS} \quad (33)$$

$$\mu_{DR2(TCR)} = (\lambda_{XL} + \lambda_{ThV} + \lambda_{ThVCS} + \lambda_{SVCCS}) \left(\frac{\lambda_{XL}}{\mu_{XL}} + \frac{\lambda_{ThV}}{\mu_{ThV}} + \frac{\lambda_{ThVCS}}{\mu_{ThVCS}} + \frac{\lambda_{SVCCS}}{\mu_{SVCCS}} \right)^{-1} \quad (34)$$

سپس احتمال حالات غیر مجاز این SVC را برای هر یک از اجزای آن با توجه به رابطه‌ی زیر به دست می‌آوریم:

جزء SVCCS, TCR, Zودتر به خرابی می‌رود و جزء ACF دیرتر و همچنین جزء THVCS, TSC زودتر به حالت تعمیر و جزء ACF دیرتر به این حالت می‌رود.

۵- نتیجه‌گیری

تحلیل قابلیت اعتماد یک سیستم قدرت ممکن است به مدل قابلیت اعتماد معادل برای اجزاء خود نیاز داشته باشد. یکی از اجزای سیستم قدرت که نقش قابل توجهی در ایمنی و قابلیت اعتماد آن دارد، SVC می‌باشد. در اینجا مدل قابلیت اعتماد برای انواع SVC با استفاده از زنجیره‌ی مارکوف ارائه شده است. ابتدا اثر اجزاء مختلف هر یک از SVC ها روی در دسترس بودن SVC تحلیل شده است. سپس بلوک دیاگرامی برای هر یک از آنها طراحی شده است. در پایان اثر نرخ خرابی و تعمیر اجزاء روی حالتی که SVC به دلیل نبودن یک جزء در سیستم به طور ناکامل در مدار می‌باشد مطالعه شد. این نتایج نشان می‌دهد که برای هر یک از SVCها برای ضرایب خطا و تعمیر کدام جزء زودتر و کدام جزء دیرتر به خطا یا تعمیر می‌رود. اقدامات آینده می‌تواند بر روی بکارگیری این مدل در ارزیابی قابلیت اعتماد یک سیستم آزمایشی برای در نظر گرفتن اثر نرخ‌های شکست و تعمیر این ابزار روی شاخص‌های قابلیت اعتماد کل سیستم متمرکز شود.

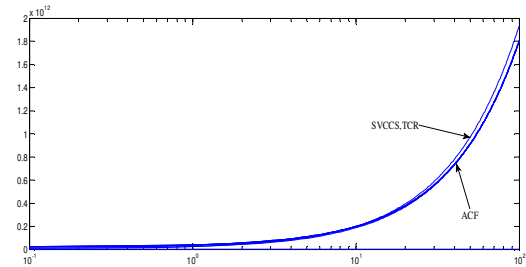
پی‌نوشت

1. Static var compensator
2. Thyristor controlled reactor
3. Thyristor switched capacitor
4. Fixed capacitor
5. AC filter
6. Reactor
7. Thyristor valve
8. Thyristor valve control system
9. Static var compensator control system
10. Thyristor controlled reactor module
11. Voltage regulator and synchronization system
12. Gate pulse generation
13. Local micro processor
14. Substation automation system
15. Human-machine interface
16. Industrial personal computer
17. Network control center
18. Intelligent electronic device
19. Bay control unit
20. Power-supply unit
21. Hierarchical level

۴-۱-۱- حساسیت احتمالی حالات غیرمجاز SVC در برابر

نرخ‌های تعمیر و خطا

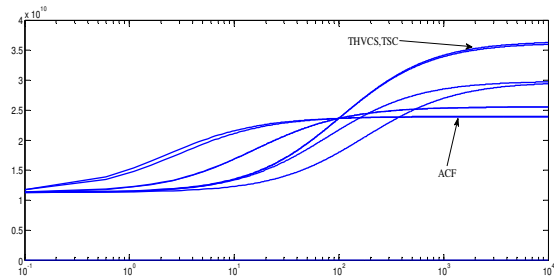
همان‌طور که در شکل (۱۷) مشاهده می‌شود تغییر نرخ خرابی TCR و SVCCS بالاترین اثر و ACF کمترین اثر را روی احتمال حالت غیرمجاز SVC نوع TCR-TSC دارد. همچنین شکل (۱۸) نشان می‌دهد که نرخ تعمیر ACF پایین‌ترین اثر و نرخ تعمیر TSC و THVCS بیشترین اثر را روی احتمال حالات غیرمجاز SVC نوع TCR-TSC دارد.



شکل (۱۷): ضرایب نرخ خرابی اصلی

اثر نرخ خرابی اجزاء بر احتمال حالت غیرمجاز TCR-TSC

Fig. (17): Effect of the components failure rate on TCR-TSC type SVC derated state probability



شکل (۱۸): ضرایب نرخ تعمیر اصلی

اثر نرخ تعمیر اجزاء بر احتمال حالت غیرمجاز TCR-TSC

Fig. (18): Effect of the components repair rate on TCR-TSC type SVC derated state probability

Table (4): Sensitive components of SVC types

جدول (۴): مؤلفه‌های حساس انواع SVC

نوع SVC	تعمیر		خرابی	
	حساس‌ترین جزء	آرام‌ترین جزء	حساس‌ترین جزء	آرام‌ترین جزء
FC	THVCS	THVCS	THVCS	THVCS
THV	THVCS	THV	TSC	TSC
ACF	THVCS, TSC	ACF	SVCCS, TCR	SVCCS, TCR

نتایج در جدول (۴) نشان داده شده است. این جدول بیان‌گر آن است که برای SVC نوع TCR-FC هم برای حالت خطا و هم برای حالت تعمیر جزء THVCS زودتر و جزء FC دیرتر به خطا و تعمیر می‌روند. برای SVC نوع TSC جزء THV برای حالت خرابی و جزء THVCS برای حالت تعمیر حساس‌تر و جزء THVCS برای حالت خرابی و جزء THV برای حالت تعمیر آرام‌تر می‌باشند. برای SVC نوع TCR-TSC

References

- [1] L. Zhang, Q. Li, W. Wang, W.H Siew, "Electromagnetic interference analysis in HV. substation due to a static var compensator device", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 27, No. 1, pp. 147-155, Jan. 2012.
- [2] S. Shahrezaei, A.A. Ghadimi, M. Gandomkar, M. Moazzami, S. Shaheidari, A.R. Afshari-Moghadam, "Assessment and improving methods of reliability indices in Bakhtar regional electricity company", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, Vol. 4, No. 14, pp. 3-10, Spring 2013 (in Persian).
- [3] Gh. Shahgholian, E. Haghjoo, A. Seifi, I. Hassanzadeh, "The improvement DSTATCOM to enhance the quality of power using fuzzy-neural controller", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, Vol. 2, No. 6, pp. 3-16, Summer 2011. (in Persian)
- [4] A. Ghorbani, M. Khederzadeh, B. Mozafari, "Impact of SVC on the protection of transmission lines", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 42, No. 1, pp. 702-709, Nov. 2012.
- [5] R. Sirjani, A. Mohamed, H. Shareef, "Optimal allocation of shant Var compensators in power systems using a novel global harmony search algorithm", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 43, No. 1, pp. 562-572, Dec. 2012.
- [6] R. Billinton, "Bibliografy on the application of probability methods in power system reliability evaluation", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, pp. 649-660, PAS-91, March 1972.
- [7] R. Billinton, R.N. Allan, Salvaderi, L.(eds.), Applied reliability assessment in electric power system, IEEE press, New York, 1991.
- [8] A. Karami, Lorestani, Golshan M, Hajin H. "Reliability modeling of TCH-FC type using Markov process", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 55, pp. 305-311, Feb. 2014.
- [9] W. Qin, C. Fu, X. Han, X. Du, "Reactive power aspects in reliability assessment of power systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 26, No. 1, pp. 85-92, June 2010.
- [10] A.A. Sallam, M. Desouky, H. Desouky, "Shunt capacitor effect on electrical distribution system reliability", IEEE Trans. on Reliability, Vol. 43, No. 1, pp. 170-176, Mar 1994.
- [11] H. Sim, J. Enderny, "Optimal preventive maintenance with repair", IEEE Trans. on Reliability, Vol. 37, No. 1, pp. 92-96, April 1998.
- [12] R. Allan, et al. "A reliability test system for educational purposes basic distribution system data and results", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, No. 2, pp. 813-820, May 1997.
- [13] P. Wang, R. Billinton, "Unreliability cost assesment of an electric power systems using reliability network equivalent approaches", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 17, No. 3, pp. 549-556, August 2002.
- [14] R.E. Brown, H.V. Nguyen, J.J. Burke, "A systematic and cost effective method to improve distribution system reliability", Proceeding of the IEEE/PSS, Vol. 2, pp. 1037-1042, Edmonton, Alta., 1999.
- [15] D.P. Subramanian, R.K.P. Devi, R. Saravanaselvan, "A new algorithm for analysis of SVC's impact on bifurcations, chaos and voltage collapse in power systems", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 33, No. 5, pp. 1194-120, June 2011.
- [16] N. Martins, N.J.P. Macedo, L.T.G. Lima, H.J.C.P. Pinto, "Control strategies for multiple static VAr compensators in long distance voltage supported transmission systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, No. 3, Aug. 1993.