مجله نخبگان علوم و مهندسی

Journal of Science and Engineering Elites

جلد ۴- شماره ۶- سال ۱۳۹۸

www.ElitesJournal.ir

کنترل پخش توان با استفاده از ترانسفرماتورشیفت فاز(PST)

سامان نمازیان *[۱]، ابراهیم مظفری[۲]، احمد زارع[۳]

۱- دانشجوی رشته مهندسی برق قدرت، دانشکده فنی حرفه ای شهرستان مرودشت

۲- دانشجوی رشته مهندسی برق قدرت، دانشکده فنی حرفه ای شهرستان مرودشت

۳- دانشگاه جامع علمی کاربردی پاسارگاد

*Samann4837@gmail.com

ارسال: دی ماه ۹۸ پذیرش: بهمن ماه ۹۸

چکیده

امروزه با توجه به توسعه و گسترش روزافزون شبکه های قدرت، مسئله کنترل بر روی پخش توان بسیار حائز اهمیت شده است. یکی از مهمترین دلایل اهمیت یافتن این موضوع، اتصال سیستم های قدرت کشورهای مختلف در نواحی مرزی و ایجاد تعاملات اقتصادی و همچنین امکان کنترل هزینه در بحث ترانزیت توان بر اساس معاهدات مدون در بازار برق می باشد. جنبه دیگر اهمیت کنترل پخش توان، بالا بردن امنیت شبکه در برابر توان های انتقالی خارج از برنامه می باشد. توان های انتقالی خارج از برنامه در واقع ناهمسانی بین توان های حقیقی که در عمل، در شبکه شارش می یابند و توان های مورد انتظار برنامه ریزی شده در بازار برق می باشند و شامل آن دسته از توان هایی می شوند که به دلیل بروز تغییرات ناگهانی در شبکه نظیر خروج یک خط یا نیروگاه، منجر به انحراف توان های انتقالی برخی از خطوط از نقطه کار آنها شده و امنیت شبکه را به مخاطره می اندازد. در حالت کلی، توان انتقالی را می توان با استفاده از ترانسفورماتورهای شیفت فاز (PST) کنترل نمود و یا در صورت نیاز به عملکردی سریعتر از ادوات FACTS که به مراتب گرانتر هستند، استفاده کرد.. هدف این پژوهش کنترل توان های خارج از برنامه با استفاده از ترانسفورماتورهای شیفت فاز می باشد که از الگوریتمی جهت کنترل همزمان چند ترانس شیفت فاز، با رویکرد کاهش توان ترانزیتی شبکه مورد مطالعه، پس از وقوع خطاهای احتمالی و بازیابی امنیت شبکه استفاده می شود.

کلمات کلیدی: توان ترانزیتی، تکنولوژی شیفت فاز ،ترانسفورماتورهای شیفت فاز(PST) .

۱- مقدمه

به دلیل توسعه هایی که سال های اخیر در سیستم های قدرت اتفاق افتاده است، این سیستم ها مجبور به انتقال توان های زیادی شده اند که این مسئله منجر به تغییر در روش های عملکرد شبکه ها شده است. یکی از موضوعاتی که به طور چشمگیری در سیستم های بهم پیوسته دارای اهمیت شده است، کنترل شارش توان است. ترانس های تغییر دهنده فاز (PST) به عنوان یک

مثال از کنترل کننده های شارش توان، در بسیاری از نقاط سیستم نصب شده اند. به طور کلی سه دلیل عمده برای استفاده از این ترانس ها وجود دارد :

۱) بازدهی مدیریت سیستم با حل مسئله نقاط پربار (دارای اضافه بار) در سیستم انتقال ، بهبود می یابد.این ترانس ها می توانند توان جاری شده از نقاط پربار را به نقاط دیگری از سیستم که ظرفیت انتقال همچنان وجود دارد، جابجا کنند. این کار باعث تاخیر در سرمایه گذاری های سیستم می شود.

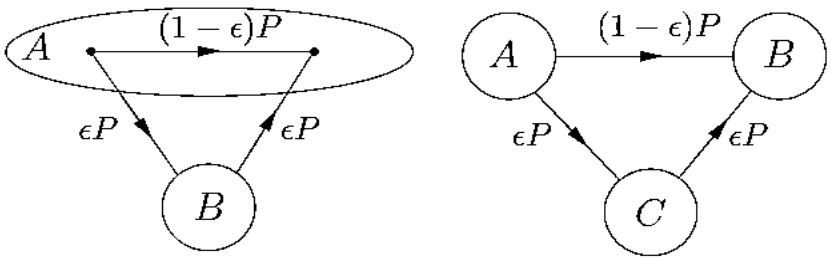
۲) دامنه وسیعی از برنامه ریزی های انتقال که توسط تصمیمات بازار گرفته می شود، باید اداره شود . پیامدهای بازارهای برق می تواند منجر به گوناگونی توان های انتقال یافته شود.PST ها می توانند امکان استفاده بهینه از ظرفیت شبکه موجود را فراهم آورند و در نتیجه قادر به کمک به مکانیزم های بازاریابی هستند.

۳) به دلیل تولیدات متغیر، تغییرات زیاد در شارش توان نیز باید کنترل شود. تولیدات برپایه انرژی های تجدید پذیر مانند باد بر پایه محرک های اولیه تصادفی هستند. طبیعت تصادفی این نوع تولیدات منجر به این حقیقت می شود که الگوی شارش توان در سیستم به طور کلی از یک لحظه به لحظه دیگر متفاوت باشد. ترکیب تولید تصادفی و تصمیمات بازار برق مشکلات توان ترانزیتی و شارش حلقه ای را افزایش می دهد که می تواند منجر به افزایش پیچیدگی در سیستم های بهم پیوسته شود. به طور کلی کنترل کننده های شارش توان و به طور ویژه PST ها امکان حل این مشکلات را فراهم می آورند.شارش توان یک ناحیه در صورت نیاز می تواند محدود یا کنترل شود[۱] .

در زمینه کنترل توان کارهای بسیاری انجام شده است. کنترل شارش توان با استفاده از ادوات FACTS در مراجع [۳,۲] پیشنهاد شده است که ازجمله نمونه این سیستم در کشور بلژیک سه PST در مرز شمالی این کشور با هلند قرار داده شده است تا امکان کنترل توان افزایش یابد.در مرجع [۷] الگوریتمی برای هماهنگ کردن چندین PST پیشنهاد شده است. هدف کاهش شارش توان برنامه‌ریزی نشده و عملکرد مطمئن سیستم است. در این روش با توجه به ظرفیت حرارتی خط انتقال، زوایای بیشینه و کمینه PST ها و توان انتقالی مورد نظر، کمترین زاویه ممکن برای PST ها طبق الگوریتم بهینه‌سازی L2-Norm محاسبه می‌شود. در یک شبکه، میزان شارش توان بستگی به مکان تولیدات و بارها و همچنین امپدانس خط دارد. در سیستم‌های بهم پیوسته، چندین مسیر موازی از تولید به مصرف ممکن است وجود داشته باشد که این مسئله توزیع شارش توان را پیچیده می‌کند . هر خط انتقال دارای ماکزیمم ظرفیت است که توسط چندین محدودیت از قبیل باردهی حرارتی و میزان پایداری خط تعیین می‌شود. وقتی توان بین دو ناحیه مبادله می‌شود، شارش توان ممکن است روی چندین مسیر موازی باشد که هر مسیر دارای باردهی متفاوتی است. در این حالت می‌توان گفت که ظرفیت انتقال بین دو ناحیه مساوی با جمع ماکزیمم ظرفیت مسیرهای بین دو ناحیه نیست. دلیل این است که یک مسیر ممکن است زودتر از دیگر مسیرها به ماکزیمم ظرفیتش برسد[۴].

- **شارش توان حلقه ای و توان ترانزیتی :**

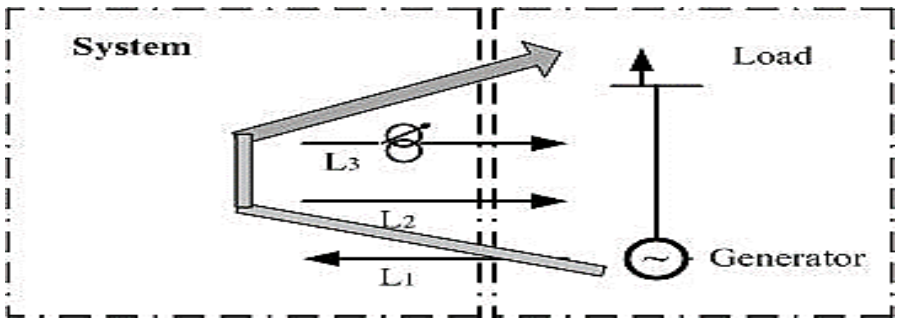
در یک شبکه به هم پیوسته، توان ممکن است بر روی چندین مسیر موازی شارش یابد که باعث بوجود آمدن توان حلقه‌ای می شود. توان حلقه ای،توان های مسیرهای موازی،توان های ترانزیتی و توان های گردشی، عبارات مشابهی هستند و اساسا به این حقیقت اشاره دارند که توان می تواند از طروق مختلف در شبکه های به هم پیوسته جاری شود. توان مبادله شده روی مسیرهای موازی بستگی به امپدانس این مسیرها دارد. شکل ۱ حالت‌های ممکن شارش توان حلقه ای را نشان می‌دهد.



الف) نوع اول: توان جاری شده حلقه‌ای ۳ بخشی ب) نوع دوم: توان جاری شده حلقه‌ای دو بخشی

شکل ۱- حالت‌های ممکن جاری‌شدن توان حلقه‌ای

شارش توان حلقه ای زمانی اتفاق می افتد که بخش کوچکی از توان مبادله شده P بین دو نقطه A و B از طریق ناحیه سوم (ناحیه C) انتقال یابد (قسمت الف درشکل۱). به عنوان مثال می توان از توان مبادله شده بین آلمان و فرانسه اشاره کرد که ۲۵ تا ۳۰ درصد از کل توان انتقالی از طریق هلند و بلژیک انتقال می یابد. عبارت توان ترانزیتی بوسیله اوپراتورهای شبکه انتقال اروپا به کار برده می شود و در این رساله از این نام استفاده می شود. توان های ترانزیتی همچنین در اروپا درمرز مشترک کشورهای هم مرزی که حداقل به طور جزئی در تبادل توان با هم، مشارکت دارند نیز به کار می رود. این حالت به طور سمبلیک در شکل ۲ نشان داده شده است توان های ترانزیتی نقش مهمی در خاموشی های سراسری امریکا داشته و همچنین در تبادلات مرزی در اروپا دارند، بنابراین لازم است به طور شایسته مدیریت شوند. مطابق با شکل ۲ اگر سیستمی داشته باشیم که توانی را از طریق ۳خط انتقال با سایر قسمت های متصل شده مبادله کند، توان ترانزیتی زمانی رخ می دهد که برخی از خطوط توان را به داخل سیستم آورده و برخی دیگر توان را از سیستم خارج کنند.



شکل ۲- توان ترانزیتی

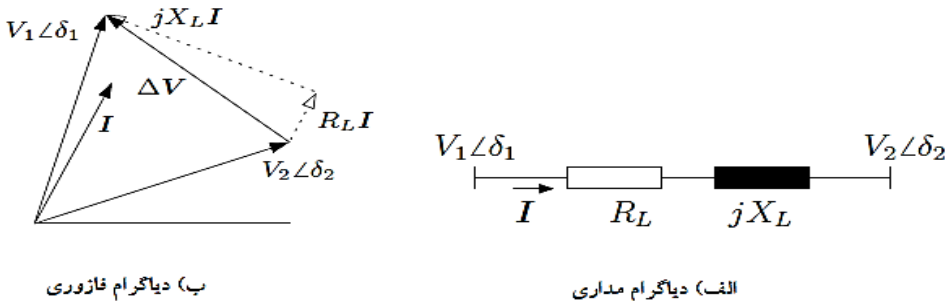
توسعه سیستم‌های قدرت منجر به بوجود آمدن مشکلاتی در کنترل شارش توان در سیستم‌های بهم پیوسته شده است. از ترانس-های تغییردهند فاز بعنوان یکی از روش‌ها جهت کنترل شارش توان استفاده می‌شود. مرجع [۱۱] به یک روش برای بهینه سازی شیفت‌دهنده فاز اشاره می‌کند که باعث صرفه اقتصادی در مدیریت ازدحام می‌شود.با استفاده از این ترانس‌ها شارش توان یک ناحیه را در صورت لزوم می‌توان محدود یا کنترل کرد.وهمچنین در مرجع [۸] روشی برای کاهش ریسک ازدحام در خطوط انتقال با استفاده از ترانسفورماتورهای شیفت فاز (PST) در خطوطی که برای توزیع توان از شبیه ساز مونت کارلو استفاده می کنند، ارائه می دهد. با استفاده از PST ها این توزیع ها با فاکتورهای مشخصی شیفت پیدا میکنند که می توانند با استفاده از مکان PST ها و توپولوژی سیستم تغییر کنند. در این مقاله مشکل ازدحام زدایی سیستم به پیدا کردن تنظیمات PST که باعث جابه جایی توزیع درون محدوده عملکرد خطوط انتقال توان شود، بستگی دارد. این روش بهینه سازی مشکل توسط یک عبارت آنالیزی قابل ارائه نیست بلکه به وسیله شبیه سازی و بهینه سازی توسط الگوریتم PSO در این مقاله ارائه شده است. این بخش به روش‌های کنترل شارش توان و به ویژه ترانس‌های تغییردهند فاز اختصاص داده شده است. جنبه‌های مختلف این نوع از

ترانس‌ها، ساختارهای ممکن آن‌ها و مسائل مدل‌سازی برای مطالعات شارش توان با جزئیات شرح داده خواهد شد. مرجع [۱۲] به یک روش برای بهینه سازی شیفت‌دهنده فاز اشاره می‌کند که باعث صرفه اقتصادی در مدیریت ازدحام می‌شود. دامنه تپ هر شیفت دهنده فاز به دو قسمت تقسیم می‌شود: یک قسمت برای اطمینان حاشیه MW داده شده در هر اتصال داخلی و قسمت دیگر برای محاسبه مکان تپ برای هر شیفت دهنده فاز برای افزایش سود اقتصادی می‌باشد.

۲- توان یک خط انتقال

همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است، یک خط انتقال را می‌توان با یک راکتانس سری شده(X_L) با مقاومت نشان داد ولتاژ های اولیه وثانویه در این فرمول با (V_1,V_2) نشان داده می شود. جریان عبوری(I) از این خط از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$I = \frac{V_1 - V_2}{Z_L} = \frac{V_1\angle\delta_1 - V_2\angle\delta_2}{R_L + jX_L} \qquad (۱)$$



ب) دیاگرام فازوری　　الف) دیاگرام مداری

شکل ۳- مدل مداری یک خط انتقال

توان (S)مختلط خط در باس ۱ به صورت رابطه زیر خواهد شد.که در این فرمول(V_1,I_1)جریان اولیه وولتاژ اولیه می باشد.

$$S = V_1 I_1^* \qquad (۱)$$

با ترکیب دو رابطه بالا داریم:

$$S_1 = \frac{V_1V_2}{\frac{R_L^2 + X_L^2}{X_L}} Sin\delta + \frac{V_1^2 - V_1V_2Cos\delta}{\frac{R_L^2 + X_L^2}{R_L}} + j\left[\frac{V_1^2 - V_1V_2Cos\delta}{\frac{R_L^2 + X_L^2}{X_L}} - \frac{V_1V_2}{\frac{R_L^2 + X_L^2}{R_L}} Sin\delta\right] \qquad (۲)$$

که δ اختلاف فاز بین دو باس است و بصورت $\delta = \delta_1 - \delta_2$ تعریف می‌شود. در این فرمول(V_1وV_2)ولتاژورودی و خروجی،(X_L) راکتانس خط مقاومت خط با نماد (R_L) نمایش داده می شود. برای خط بدون تلفات ($R_L = 0$)، توان‌های اکتیو و راکتیو خط به صورت زیر می‌شود.

$$P_1 = \frac{V_1V_2}{X_L} Sin\delta \quad , \quad Q = \frac{V_1^2}{X_L} - \frac{V_1V_2}{X_L} Cos\delta \qquad (۴)$$

توان‌های اکتیو(P_1) و راکتیو(Q) (طبق رابطه بالا) تابعی از چهار پارامتر راکتانس خط(X_L)، زاویه فاز($\boldsymbol{\delta}$) و ولتاژ باس-ها(V_2,V_1) هستند. هر کدام از این پارامترها را می‌توان تغییر داد تا توان خط انتقال تغییر کند.

تجهیزات مرسوم برای دستیابی به این هدف شامل اضافه کردن امپدانس‌های سری (خازن‌ها یا اندوکتانس‌ها) و یا استفاده از PSTها هستند. توسعه‌های جدید در الکترونیک قدرت کاربردهای جدیدی را به این وسایل اضافه کرده است و حتی منجر به یک خانواده کامل کنترل‌کننده‌ها تحت نام ادوات FACTS[1] شده است[۸].

۳- پارامترهای کنترل شده

همانطور که در رابطه (۴) نشان داده شد، توان اکتیو خط انتقال می‌تواند توسط اندوکتانس خط، اندازه و زاویه ولتاژ باس‌ها کنترل شود.

➢ راکتانس خط

توان اکتیو خط به طور معکوس با راکتانس خط(XL) متناسب است. تنظیم راکتانس خط با خازن‌های سری (WC) امکان‌پذیر است. بنابراین کل راکتانس خط به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$X_L = j\,(wL - \frac{1}{wC}) \qquad (۵)$$

گاهی اوقات خازن‌های سری برای جبران‌سازی استفاده می‌شوند. برای کنترل قابل انعطاف‌تر می‌توان از راکتور کنترل‌شده با تریستوربه‌صورت موازی با یک خازن ثابت استفاده کرد. این وسیله مانند یک خازن قابل کنترل رفتار کرده و جبران‌سازی کافی را برای خط فراهم می‌کند. همچنین از آن می‌توان برای کم کردن نوسانات ولتاژ نیز استفاده نمود.

۴- تکنولوژی شیفت فاز

PST ها به فرم‌های مختلفی هستند . آن‌ها می‌توانند با مشخصه‌های زیر تقسیم‌بندی شوند[۹-۱۰] .

- ✓ PST های نوع مستقیم که برپایه یک هسته سه فاز هستند. با اتصال سیم‌پیچی‌ها به یکدیگر به طرق مناسب تغییر فاز بدست می‌آید.
- ✓ PSTهای نوع غیرمستقیم که برپایه ساخت با استفاده از دو ترانس مجزا هستند. یکی محرک تپ متغیر برای تنظیم دامنه ولتاژ متعامد و دیگری ترانس سری برای تزریق ولتاژ متعامد در خط است.
- ✓ PSTهای نوع نامتقارن که یک ولتاژ خروجی با زاویه فاز و دامنه اصلاح شده نسبت به ولتاژ ورودی بوجود می‌آورند.
- ✓ PSTهای نوع متقارن که یک ولتاژ خروجی با زاویه فاز اصلاح شده نسبت به ولتاژ ورودی با دامنه یکسان بوجود می‌آورند.

ترکیب این مشخصه‌ها منجر به ۴ نوع از PSTها می‌شود. این ۴ نوع در ادامه توضیح داده می‌شوند.

➢ PSTهای نامتقارن مستقیم

شکل (۴) ساختار یک PST نامتقارن مستقیم را نشان می‌دهد. ترمینال‌های ورودی L_1 تا L_3 هستند. سیم‌پیچی با تپ متغیر متصل شده به ترمینال‌های ورودی به صورت مغناطیسی با سیم‌پیچ بین دو ترمینال دیگر کوپل شده است. با این کار یک ولتاژ متعامد، که می‌تواند به وسیله تپ متغیر تنظیم شود، به ولتاژ ورودی اضافه می‌شود تا یک شیفت فاز α بدست آید. با استفاده از کلیدها می‌توان جهت شیفت فازی را تغییر داد. با این روش، شارش توان در خط می‌تواند افزایش یا کاهش یابد. رابطه بین موقعیت تپ و زاویه غیرخطی است و می‌تواند از دیاگرام فازوری (قسمت ب در شکل (۴) استخراج شود.

$$\alpha = \arctan(\frac{\Delta V}{V_1}) \quad (۶)$$

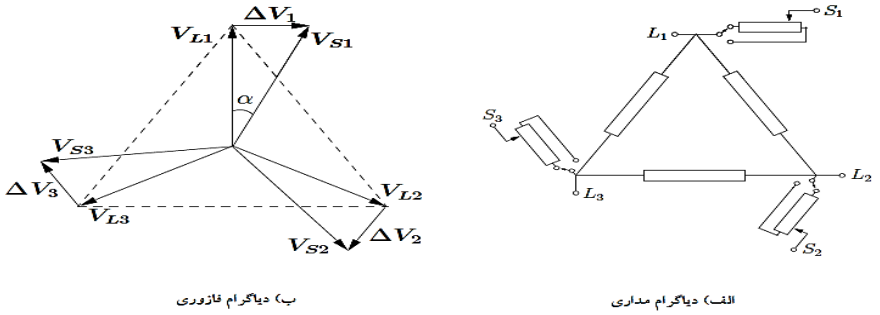
بین ولتاژ ثانویه ولتاژ متعامد تزریقی رابطه زیر برقرار است.درفرمول شمار(۶)arctan(نماد تابع مثلثاتی)و همچنین دلتا Vنماد اختلاف ولتاژمی باشد.

$$V_{S1} = (\frac{\Delta V_1}{Sin\alpha}) \quad (۷)$$

با استفاده از روابط (۶) و (۷) داریم:

$$V_{S1} = \frac{\Delta V_1}{Sin(\arctan\frac{\Delta V_1}{V_{L1}})} \quad (۸)$$

ولتاژ ثانویه V_{S1} (برای یک شیفت غیر صفر) همیشه بیشتر از ولتاژ ورودی V_{L1} است.



شکل ۴- PST نامتقارن مستقیم

این حقیقت که سطوح ولتاژ تغییر می‌کند، بر روی توان انتقالی خطوط تاثیر می‌گذارد.

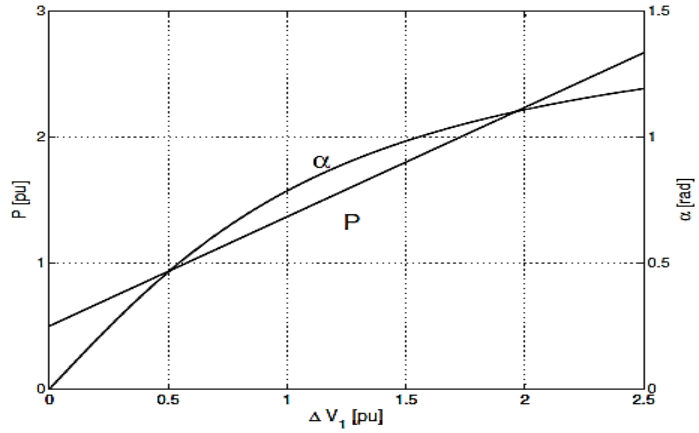
$$P = \frac{V_{S1}V_2}{X_L + X_{pst}} Sin(\delta + \alpha) \quad (۹)$$

که X_L راکتانس خط X_{pst} راکتانس ترانس و α شیفت فازPST است. با استفاده از روابط (۶) و (۸) و ساده سازی، رابطه (۹) به صورت زیر می‌شود.

$$P = \frac{V_2}{X_L + X_{pst}} (V_{L1} Sin\delta + \Delta V_1 Cos\delta) \quad (۱۰)$$

برای δ ثابت، رابطه بین ولتاژ متعامد و توان اکتیو خط به‌صورت خطی است. X_{pst} راکتانس ترانس

روابط (۶) و (۱۰) در شکل زیر برای $\delta = \frac{\pi}{6} = 30^0$ رسم شده‌اند. V_{L1}و $\frac{V_2}{X_L + X_{pst}}$ را ۱PU در نظر گرفته است.

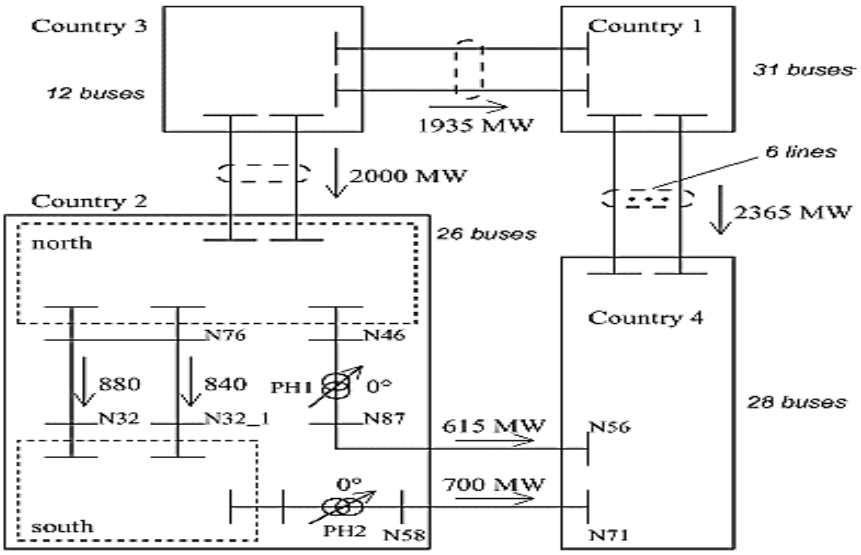


شکل۵- رابطه بین P، α و ولتاژ متعامد برای یک PST نامتقارن مستقیم

منحنی α برای مقادیر $\alpha = 0^o$ تا $\alpha = 34^o$ نسبتا خطی است.

۵- بررسی یک شبکه به عنوان نمونه

شبکه مورد نظر در شکل زیر نشان داده شده است.



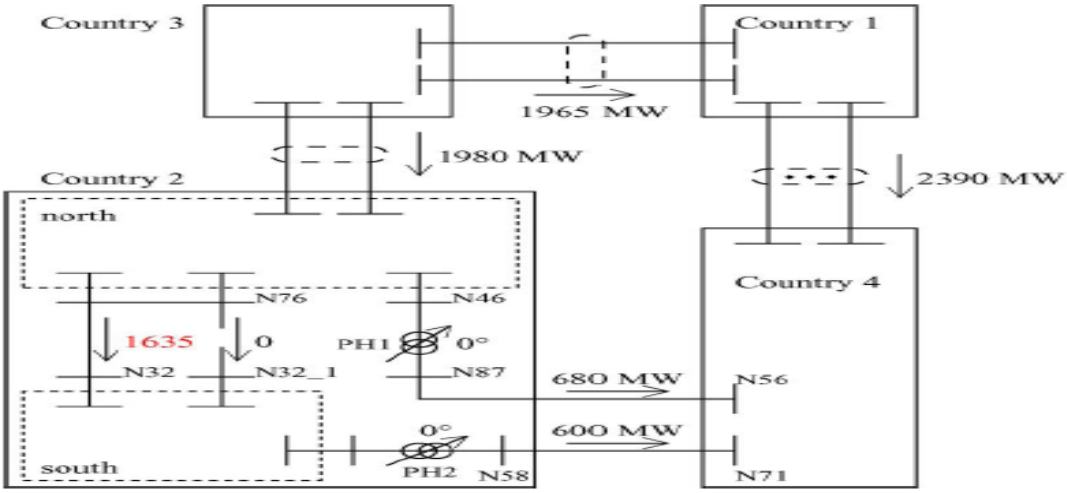
شکل ۶- ساختار سیستم نمونه با نقطه‌های عملکرد پایه

شارش توان‌های اکتیو در حالت پایه با زاویه‌های صفر برای هر دو PST در شکل نشان داده شده است. توان ترانزیتی از طریق کشور ۲ برابر است با $t = (3315 - 685)/2 = 1315$ MW.

با توجه به شکل۶، یک حلقه اصلی و یک حلقه فرعی داریم. حلقه اصلی شامل خطوطی است که چهار سیستم را به هم وصل می‌کند. درون این حلقه کشورهای ۱ و ۳ توان صادر و کشورهای ۲ و ۴ توان وارد می‌کنند. دو PST کشور۲ با هم موازی هستند. با تغییر زاویه این PSTها در جهت یکسان، اپراتورهای سیستم انتقال می‌توانند جهت شارش توان را از مسیر ۴-۲-۳ به مسیر ۴-۱-۳ تغییر دهند. حلقه فرعی شامل دو مسیر از شمال به جنوب کشور۲ است. یک مسیر از طریق خطوط داخلی N76-N32 و N76-N32_1 و مسیر دیگری از طریق خطوط N87-N56 و N58-N71. دو PST موجود در این حلقه فرعی به

صورت سری با هم قرار دارند و زاویه‌هایشان را در جهت مخالف هم تنظیم می‌کنند تا شارش توان بین دو مسیر ذکر شده را تغییر دهند.

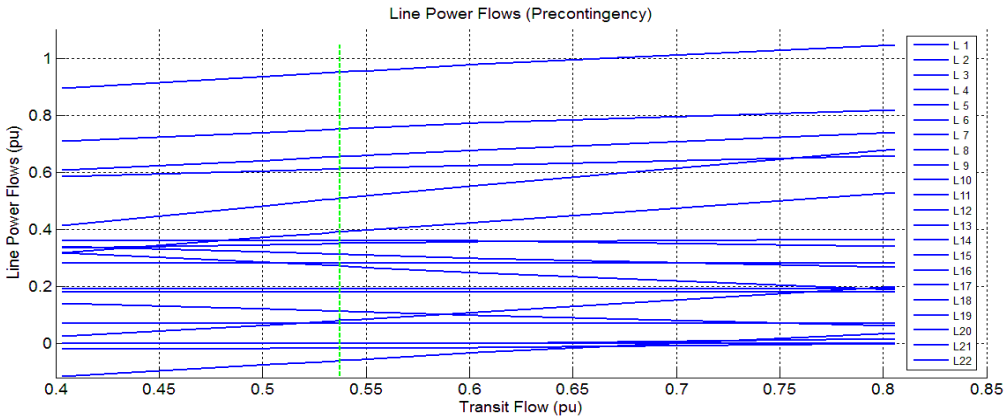
آنالیز امنیت در کشور۲ انجام می‌گیرد. شکل (۷) چگونگی شارش توان را بعد از قطع خط N76-N32_1 نشان می‌دهد. خط N76-N32 به طور زیادی اضافه بار پیدا کرده است. برای آنالیز حساسیت هر سیستمی که درون یک شبکه بهم پیوسته قرار دارد، ارائه صحیحی از سیستم خارجی (کشورهای ۱و۲ و۳ در این مثال) به منظور دستیابی به تاثیر رخدادها و تنظیم PSTها ضروری است. این مثال با فرض اینکه مدل کل سیستم برای اپراتورهای سیستم انتقال کشور۲ موجود است، انجام گرفته است.



شکل ۷ – شارش توان بعد از قطع خط N76-N32_1

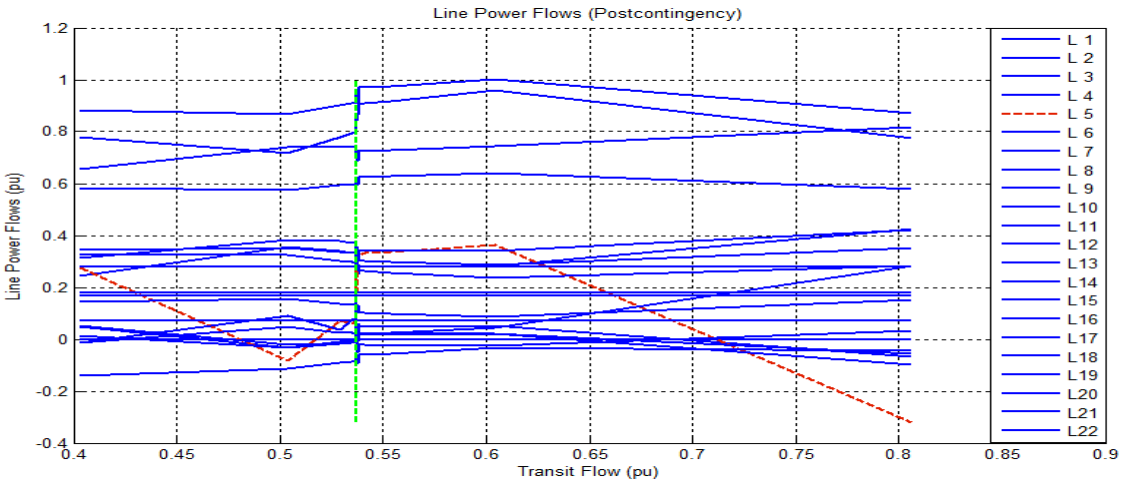
۶– بازیابی پیشگیرانه امنیت اصلاحی

در این قسمت روش ارائه شده در بخش‌های قبل بررسی می‌شود تا سیستم با توجه به دو رخدادی که قبلا بیان شد، ایمن شود. فرض می‌شود ماکزیمم تغییر زاویه بعد از رخداد ($\Delta\phi^{max}$) 10^0باشد. بنابراین برای نقطه عملکرد اولیه نشان داده شده در شکل(۶) ، سیستم بطور اصلاح‌پذیر ایمن نخواهد بود (همانطور که قبلا برای از دست رفتن خط N76-N32_1 نشان داده شد) و زاویه PSTها در ساختار قبل از رخداد باید تنظیم شود.



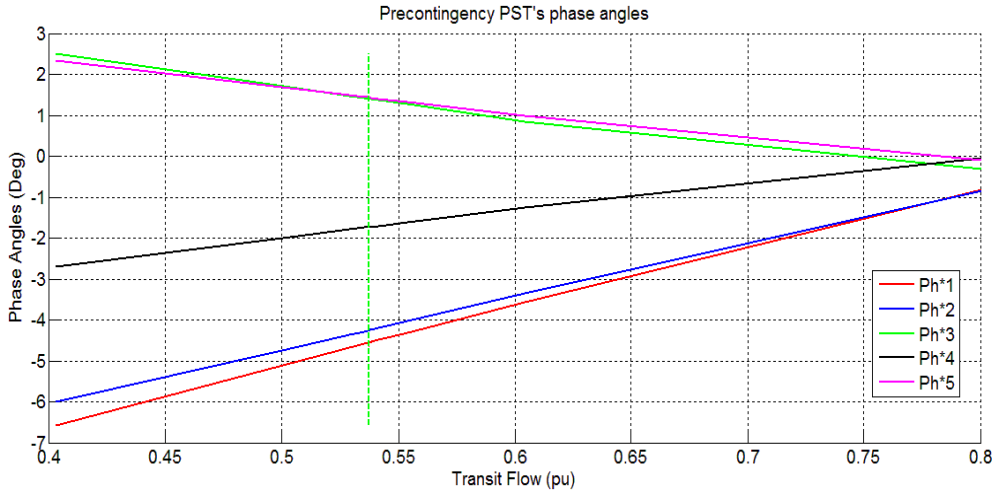
شکل ۸– تغییرات توان انتقالی خطوط مربوط به حالت پیش از خطا به ازای تغییرات توان ترانزیتی

شکل(۸) تغییرات توان انتقالی خطوط به ازای تغییرات توان ترانزیتی در حالت پیش از قطعی در خط L_3 را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود این تغییرات بصورت خطی است. خط عمودی سبز رنگ مقدار توان ترانزیتی در آخرین تکرار الگوریتم را نشان می دهد و نقاط تقاطع با خطوط دیگر، مقدار نهایی هر خط را به ازای آخرین تکرار نشان می دهد.



شکل ۹- تغییرات توان انتقالی خطوط مربوط به حالت پس از خطا به ازای تغییرات توان ترانزیتی

شکل(۹) تغییرات توان انتقالی خطوط به ازای تغییرات توان ترانزیتی در حالت بعد از قطعی در خط L_3 را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود این تغییرات بصورت خطی نمی باشد، زیرا در پروسه الگوریتم کنترلی، زاویه PST ها مدام در حال تغییر است و در نتیجه توان انتقالی خطوط نیز تغییر می کند.



شکل ۱۰- تغییرات زوایای PST ها مربوط به حالت پیش از خطا به ازای تغییرات توان ترانزیتی

شکل(۱۰) تغییرات زوایای PSTها به ازای تغییرات توان ترانزیتی در حالت پیش از قطعی در خط L_3 را نشان می دهد. با توجه به اینکه در ساده سازی الگوریتم کنترلی، رابطه خطی بین توان انتقالی خطوط و زاویه PST ها در نظر گرفته شده است و از آنجا که تغییر توان ترانزیتی رابطه خطی با تغییر توان انتقالی خطوط در حالت پیش از رخداد دارد (شکل ۴-۵)، لذا رابطه خطی بین تغییرات زوایای PST ها به ازای تغییرات توان ترانزیتی در حالت پیش از قطعی در خط L_3 به وضوح در شکل بالا نشان داده شده است.

۷- نتیجه گیری

در این پژوهش ، الگوریتم کنترلی بدست آمده از روش پخش بار بهینه مقید شده به امنیت به منظور اصلاح جهت کمینه سازی توان های خارج از برنامه، پس از وقوع خطا در شبکه هر استان با استفاده از نرم افزار متلب شبیه سازی شده است. در حالت کلی

این الگوریتم با هدف حداقل انحراف از نقطه کار، پس از وقوع خطا با رویکرد کاهش توان ترانزیتی شبکه و به کمک ترانسفورماتورهای شیفت فاز، سعی می کند امنیت را به شبکه بازگرداند. در واقع پس از بروز خطا چنانچه شبکه در حالت غیر ایمن قرار بگیرد، این ناایمن بودن به توان ترانزیتی بیش از اندازه نسبت داده می شود و الگوریتم در تکرارهای متوالی، با کاهش این توان و تنظیم زاویه ترانسفورماتورهای شیفت فاز امنیت را به شبکه باز می گرداند. در این الگوریتم تکراری، عاملی که بیشترین تاثیر را در کاهش توان های خارج از برنامه پس از وقوع خطا در شبکه دارد، کاهش دادن توان ترانزیتی است.کاهش توان ترانزیتی به هنگام بروز خطا همچنین باعث استقلال بیشتر ناحیهٔ تحت پوشش ترانسفورماتور شیفت فاز از سایر نواحی همسایه شده و این مسئله به خودی خود میل شبکه به حالت جزیره‌ای شدن را به هنگام بروز خطا افزایش می دهد و احتمال خاموشی سراسری کاهش می یابد.

با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه سازی برای هر استان، می توان نتیجه گرفت که این الگوریتم به خوبی قادر است پس از وقوع خطا در شبکه هر استان با کاهش توان ترانزیتی، اضافه بار خطوطی که دارای اضافه بار شده اند را برطرف کرده و امنیت را به شبکه باز گرداند. همچنین در هر استان، کاهش توان ترانزیتی با قید حرارتی خطوط توأم است و این مهم باعث کاهش توان انتقالی خطوطی می‌شود که سهمی از توان ترانزیتی خط قطع شده را منتقل می‌کردند، لذا احتمال خروج سایر خطوط به دلیل اضافه بار حرارتی کاهش می یابد.

۸- مرجع

1. Verboomen, J., Van Hertem, D., Schavemaker, P. H., Kling,W. L., and Belmans, R., "Border-flow control by means of phase shifting transformers," presented at the IEEE PowerTech Conf., Lausanne, Switzerland, paper No 160, Jul. 2007

2. Hingorani, N. G., and Gyugyi, L. "Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems". IEEE Press, Piscataway, 2000.

3. Han, Z. X." Phase Shifter and Power Flow Control." IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-101, 10), pp. 3790,(October 2002).

4. Hayward, D., Miller, J. M.,Balmat, B. M., Morris, N. J. Malinowski,H. B., Pasternack,M and Eilts, L. E, "Operating problems withparallel flows," IEEE Trans. Power Syst., vol. 6, no. 3, pp. 1024–1034.,Aug 1991

5. Bresesti, P., Sforna, M., Allegranza, V., Canever, D., and Vailati, R., "Application of phase shifting transformers for a secure and efficient operation of the interconnection corridors," presented at the IEEE PES General Meeting, Denver, CO, Paper 001318 ., 2004.

6. Marinakis, et al., "Minimal Reduction of Unscheduled Flows for Security Restoration: Application to Phase Shifter Control," IEEE Transacions on Power System, vol. 25, pp. 506-515,February 2010.

7. transformers for a secure and efficient operation of the interconnection corridors," presented at the IEEE PES General Meeting, Denver, CO, Paper 001318 ., 2004.

8. Han, Z. X. " Phase Shifter and Power Flow Control."IEEE Transactions on Power Apparatus andSystem,PAS-101, 10 (October 1982).

9. Verboomen, J., et al., "Analytical approach to grid operation with phase shifting transformers," IEEE Transacions on Power System " vol. 23.,2008

10. Damrongkulkamjorn, P., Arcot, P. K., Dcouto, P., and Gedra, T. W." A screening technique foroptimally locating phase shifters in power systems". In Proceedings of the IEEE PES Transmission and Distribution Conference ,pp. 233 (Chicago, USA, April 1994).

11. Damrongkulkamjorn, P., Arcot, P. K., Dcouto, P., and Gedra, T. W." A screening technique foroptimally locating phase shifters in power systems". In Proceedings of the IEEE PES Transmission and Distribution Conference ,pp. 233 (Chicago, USA, April 1994).