مجله نخبگان علوم و مهندسی
Journal of Science and Engineering Elites
ISSN 2538-581X
جلد ۲- شماره ۳- سال ۱۳۹۶
www.ElitesJournal.ir

مطالعه و بررسی توپولوژی‌های گوناگون کنترل‌کنندهٔ قدرت میان فاز و معرفی قابلیت‌ها و استراتژی‌های کنترلی حاکم بر آن

بهروز نجفی[1]*

۱- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد

*behroz1.najafi1@gmail.com

ارسال: تیر ماه ۹۶ پذیرش: مرداد ماه ۹۶

چکیده

احداث خطوط جدید ،یکی از راه‌های افزایش ظرفیت انتقال توان است، اما این امر ممکن است ازنظر عملی میسر نباشد و یا ازنظر اقتصادی مقرون به‌صرفه نباشد. در این راستا در سال‌های اخیر جهت افزایش ظرفیت خطوط انتقال،فن‌آوری FACTS به شبکه‌های قدرت معرفی شده است. تجهیزات FACTS نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش قابلیت کنترل و انتقال توان شبکه ac و عبور توان از مسیرهای دلخواه را دارند. بر این اساس تمرکز این مقاله نیز بر مطالعه یکی از تجهیزات جدید FACTS بنام کنترل‌کننده قدرت میان فاز(IPC)[1] است که اخیراً برای کاربردهایی نظیر کاهش جریان اتصال کوتاه، مجزا سازی دو شبکه و کنترل توان در سیستم قدرت مورد توجه قرارگرفته است. در این مقاله صرفا با مرور منابع مختلف، ساختار IPC، توپولوژی‌های مختلف آن، قابلیت‌ها و استراتژی‌های مختلف کنترلی حاکم بر آن را معرفی خواهد شد.

کلمات کلیدی: کنترل‌کننده FACTS، کنترل‌کننده قدرت میان فاز (IPC)، توپولوژی‌های IPC ، استراتژی‌های کنترلی IPC.

۱. مقدمه

یکی از مشکلات عمده در بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت ،عبور توان در مسیرهای ناخواسته و عدم بهره‌برداری کامل از ظرفیت واقعی خطوط انتقال است. سیستم‌های انتقال انرژی با گسترش روزافزون مصرف انرژی و توسعه شبکه‌های قدرت، با بحران محدودیت انتقال توان مواجه هستند. این محدودیت‌ها عملاً به خاطر حفظ پایداری و تأمین سطح مجاز ولتاژ به وجود می‌آیند؛ بنابراین ظرفیت بهره‌برداری عملی خطوط انتقال بسیار کمتر از ظرفیت واقعی خطوط که همان حد حرارتی آن‌هاست، می‌باشد. این امر موجب عدم بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های انتقال انرژی خواهد شد. یکی از راه‌های افزایش ظرفیت انتقال توان، احداث خطوط جدید است، اما ایجاد خطوط انتقال جدید مستلزم صرف زمان و هزینه‌های گزاف بوده و لذا در صورت امکان استفاده از همان خطوط با ظرفیت انتقال بالاتر بسیار مقرون‌به‌صرفه است. با پیشرفت صنعت نیمه‌هادی‌ها و استفاده از آن‌ها در سیستم قدرت، در دهه ۱۹۸۰ مرکز تحقیقات برق EPRI[2] در ایالات متحده، سیستم‌های انتقال جریان متناوب

[1] Interphase Power Controller
[2] Electrical power research institue

انعطاف‌پذیر (FACTS)[3] را به شبکه‌های قدرت جهت افزایش ظرفیت خطوط انتقال، معرفی کرد تا بدون احداث خطوط جدید بتوان از ظرفیت واقعی سیستم انتقال استفاده کرد و عبور توان را در مسیرهای مور نظر کنترل نمود [۱].

سیستم انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر، توسط انجمن مهندسان برق و الکترونیک(IEEE) [4] به این صورت تعریف شده است: سیستمی بر اساس ادوات الکترونیک قدرت و دیگر تجهیزات استاتیکی که کنترل یک یا چندین پارامتر سیستم انتقال انرژی جریان متناوب را برای بهبود کنترل‌پذیری و افزایش توانایی انتقال قدرت الکتریکی محقق می‌سازد. اولین بار مفهوم ادوات FACTS توسط هینگورانی[5] در سال ۱۹۸۸ بیان شد که پس از سال‌ها تحقیق و توسعه امروزه استفاده از آن در شبکه‌های الکتریکی روزبه‌روز گسترش بیشتری می‌یابد[۲].یکی از مؤثرترین تجهیزاتFACTS که قابلیت‌ها و کاربردهای مختلفی دارد کنترل‌کننده توان میان فاز (IPC) است.IPC اولین بار در اواسط دهه ۱۹۸۰ مطرح شد، مطالعات جدی در این زمینه در یک مرکز پژوهش و توسعه موسوم به CITEQ که توسط Quebec Hydro و ABB کانادا تشکیل‌شده است انجام گردید. IPC تکنولوژی است که قادر به کنترل پخش‌بار در شبکه‌هایAC ، است و به‌طور مؤثری جریان‌های اتصال کوتاه بالا را محدود می‌کند.

مرور ادبیات پژوهش گواه بر آن است که تلاش‌های زیادی از محققان در سرتاسر جهان در قالب روش‌ها و اهداف مختلف در زمینهIPC منتشرشده که البته هریک مزایا و معایب خاص خود را دارند.در این مقاله سعی برآن است که صرفا با مرور منابع مختلف و گردآوری اطلاعات بدست آمده ، ساختار این کنترلر را بررسی کرده و قابلیت‌ها و توپولوژی‌های مختلف آن را معرفی کنیم و در پایان با توجه به پارامترهای کنترلی آن،استراتژی‌های کنترلی حاکم بر آن را توضیح دهیم. از این رو در ادامه با تاکید بر پژوهش انجام گرفته در [۳] ،عمده‌ترین تحقیقات انجام‌شده در این زمینه را ، با معرفی مهم‌ترین شاخص‌های آن‌ها بیان می‌کنیم. ساختار IPC و قابلیت‌های آن در بخش سوم آمده است. توپولوژی‌هایIPC در بخش چهارم توضیح داده شده است.در بخش آخر هم استراتژی‌های کنترلی حاکم بر آن را بیان کرده‌ایم.

۲. مروری بر مطالعات پیشین در زمینه IPC

در [۴] مفهومIPC به معنای اتصال سری امپدانس‌های بین فازهای مختلف دو زیر شبکه که باهم اتصال داخلی دارند تعریف‌شده است.IPC مطرح‌شده در پژوهش [۴] به‌صورت منبع جریانی با مشخصات زیر معرفی‌شده است:

۱-گردش توان برای دامنه وسیعی از زوایای بین دو زیر شبکه ($\pm 25^{o}$) تقریباً ثابت (در حدود ۱۰٪) است.

۲-بااتصال داخلی بین دو زیر شبکه هیچ‌گونه افزایش چشمگیری در سطح اتصال کوتاه به وجود نمی‌آید.

۳-حوادث محتمل مهمی که در قسمت IPC رخ می‌دهند اثر ناچیزی بر ولتاژهای سمت دیگر خواهند گذاشت.

۴-چون هیچ‌گونه کنترل‌کننده‌ای موردنیاز نیست، بنابراین هیچ هارمونیکی تولید نخواهد شد.

این مرجع بابیان مفهوم اولیه‌ی IPC دو طرح از آن را بانام IPC240 و IPC120 مورد بحث قرار داده و تأثیر پارامترهای مختلف را بر آن‌ها بررسی کرده است؛ و نشان می‌دهد که IPC120 توان اکتیو را با استفاده از مقادیر ثابت سوسپتانس کنترل می‌کند. سوسپتانس‌ها به مجموعه‌ای از کلیدها متصل می‌شوند که قادر هستند جهت توان اکتیو را معکوس کنند.

پورحسین و همکارانش در [۵] ساختار جدیدی از IPC را تحت عنوان کنترل‌کننده‌ی توان میان فاز یکپارچه (UIPC)[6] معرفی کرده‌اند و آن را با IPC و UPFC مقایسه کرده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داده است که UIPC به‌طور هم‌زمان قابلیت‌های

[3] Flexible Alternative Current Transmission System
[4] The Institute of Electrical and Electronics Engineers
[5] Hingorani
[6] Unified Interphase Power Controller

IPC و UPFC را داراست. این محققان در تلاش دیگری در [۷-۶] ساختار جدیدی از IPC تحت عنوان SIPC ،را برای مطالعات پخش‌بار و اتصال کوتاه معرفی کرده‌اند.

یک الگوریتم مؤثر برای مشخص کردن پارامترهای IPC به‌عنوان محدودکننده جریان خطا در [۸] ارائه‌شده و ضمن تعیین مقادیر مناسب برای پارامترهای IPC (به‌منظور عبور توان دلخواه) به جایابی بهینه این عنصر بر روی فیدرهای منتهی به پست پرداخته‌شده است. در [۹] به‌منظور کاهش مقادیر نامی IPC و درنتیجه کاهش در هزینه‌ها و تلفات، اصلاحاتی در مفهوم اصلی آن صورت گرفته است. ابتکار مهم این مقاله استفاده از ترانسفورماتورهای جابجا کننده‌ی فاز (PST) به‌منظور به‌کارگیری ولتاژهای فازی برای دو سوسپتانس موجود است.IPC حاصل که‌IPC تزریقی ولتاژ نامیده می‌شود با تزریق ولتاژهای ربعی به‌صورت سری با دو سوسپتانس باعث جابجایی فاز می‌شود.در [۱۰] جنبه‌های طراحی عملی یک نمونه اولیه‌ی IPC ۲۰۰ مگاواتی برای اتصال شبکه‌های ۱۲۰ کیلوولتی توصیف شده است.IPC سازگار با شرایط بهره‌برداری شبکه‌ها در [۱۱] بررسی می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که IPCها، می‌توانند با شرایط بهره‌برداری خاص سازگار شوند و این سازگاری منجر به بهینه‌سازی می‌شود.

کاربرد فناوری IPC برای کنترل پخش‌بار در خط انتقال با استفاده از ترانسفورماتور جابجا کننده فاز کمکی (APST)[۷] تکنیک متفاوتی است که در [۱۲] آمده است. تکنولوژی IPC با ساختار جدید تحت عنوان ترانسفورماتورهای محدودکننده‌ی جریان خطا (FCLT)[۸] به‌عنوان روشی جدید برای محدود کردن جریان اتصال کوتاه در پست‌های فشارقوی در [۱۳] پیشنهادشده است. در [۱۴] مطالعات شبیه‌سازی مربوط به فناوری IPC بررسی‌شده است؛ و عواملِ تأثیرگذار بر طراحی IPC از قبیل، اضافه ولتاژ (ناشی از باز شدن یک سر IPC)، نامتعادلی ولتاژ، تغییرات فرکانس سیستم و عملکرد با یک یا دو فاز خارج از سرویس و ... را بیان کرده است. در این مقاله ادعا شده است که در یک سیستم قوی،IPC می‌تواند با یک یا دو فاز باز در یک‌طرف کار کند مشروط به اینکه در سمت دیگر هر سه فازPST برقدار باشد.توضیحات مربوط به نصب اولین IPC در جهان، تلاش دیگری است که محققان در این راستا در [۱۵] گزارش کرده‌اند. این IPC به‌منظور افزایش توان قابل‌انتقال خط ارتباطی بین دو پست Plattsburgh و Sandbar در پست سازمان برق نیویورک (NYPA) به بهره‌برداری رسیده است.نتایج حاصل از سال اول بهره‌برداری از آن در تأسیسات Plattsburgh نشان می‌دهد که انتقال انرژی کل برای دوره تابستان ۱۹۹۸، در مقایسه با سال گذشته ۷۷ گیگاوات ساعت (۲۵/۷ درصد) افزایش‌یافته است.

مطالعه عملی برای تبدیل یک اتو ترانسفورماتور ۳۴۵/۱۳۸ کیلوولت به یک ترانسفورماتور محدودکننده‌ی جریان خطا (FCLT) در [۱۶] گزارش شده است. در [۱۷] تنظیمات پخش‌بار سیستم به‌وسیله IPC توضیح داده‌شده و نشان داده‌شده که تلفات شبکه با به‌کارگیری IPC بهینه‌شده است.

در [۱۸] با انجام مطالعه موردی برروی شبکه‌ی برق منطقه‌ای تهران، استفاده از کنترل‌کننده توان میان فاز برای کنترل سطح اتصال کوتاه در شبکه‌های انتقال توان توضیح داده‌شده است در [۱۹] شکل جدیدی از IPC با جایگزین کردن PSTهای معمولی، با PSTهای استاتیکی، تحت عنوان TC-IPC[۹] مدل‌سازی و شبیه‌سازی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها در این تحقیق نشان داد که TC-IPC ضمن حفظ کارآمدی IPC می‌تواند توان‌های اکتیو و راکتیو را در خط افزایش دهد، پایداری سیستم را ارتقا بخشد و عملکرد دینامیکی سیستم را بالا ببرد. مدل‌سازی TC-IPC برای مطالعات دینامیکی سیستم قدرت در [۲۰] بررسی می‌شود. در این تحقیق، مدل خطی هفرون- فیلیپس با نصب TC-IPC برای تحلیل پایداری نوسانی سیستم قدرت توضیح داده می‌شود و سپس مدل دینامیکی TC-IPC با مدل خطی هفرون-فیلیپس ترکیب می‌شود. بر اساس مدل پیشنهادی، TC-IPC برای میرا کردن نوسانات سیستم قدرت خیلی مؤثر است.

---

[7] Assisted Phase Shifting Transformer

[8] Fault Current Limiting Transformer

[9] Thyristor Controlled - Interphase Power Controller

۳. ساختار IPC و قابلیت‌های آن

در ساختار IPC از تجهیزات مرسوم مانند خازن، سلف، ترانس فیزشیفتر(PST) و قطع کننده‌های مدار استفاده می‌شود یک ساختار عمومی از آن در شکل ۱ نشان داده‌شده است[۶].

طبق ساختار کلی ارائه‌شده در شکل ۱ هر فاز IPC از دو شاخه موازی که یکی سلفی و دیگری خازنی است تشکیل‌شده است. هرکدام از این شاخه‌ها دارای یک ترانس فیزشیفتر با شیفت فازی φ_1 و φ_2 می‌باشند. ترانس‌های فیزشیفتر تأمین‌کننده ولتاژهای جابجا کننده فاز هستند تا یک ولتاژ سری قابل‌کنترل را در خط تزریق کنند [۲۲-۲۱]. در واقع در ساختار IPC وظیفه ایجاد تغییر فاز و کنترل توان اکتیو خروجی بر عهده PST است.بنا به شکل ۱، IPC دارای چهار پارامتر قابل‌کنترل شامل زوایای فیزشیفتر φ_1 و φ_2 ناشی از عملکرد ترانس‌های فیزشیفتر و نیز راکتانس‌های خازنی و القایی X_L وX_C است.

IPC اساساً برای کنترل سیلان‌های توان (PFC)[10] در خط انتقال ابداع‌شده است و به خاطر داشتن توپولوژی‌های مختلف، قابلیت‌های جذاب دیگری نیز دارد. با استفاده از نتایج ثبت شده در [۲۲] قابلیت‌های مهم IPC، به صورت زیر دسته بندی می‌شود :

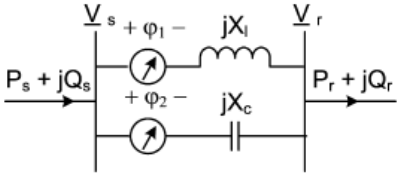
الف :محدودسازی جریان خطا[11] و ایزولاسیون دو شبکه از هم به هنگام اتصال کوتاه

ب :تزریق و یا جذب توان راکتیو از شبکه

ج :قابلیت تثبیت و کنترل سیلان توان انتقالی از طریق تنظیم زاویه فاز

د :بهبود پایداری دینامیکی شبکه

در [۲۲] قابلیت‌ها و مزایای IPC نسبت به راه‌حل‌های متداول کلاسیک در حل مشکلات شبکه‌های قدرت با هم مقایسه شده و نتایج آن در جدول ۱ نشان داده‌شده است.



شکل ۱- ساختار عمومی کنترل‌کنندهٔ توان میان فاز

جدول ۱- مزایای IPC در مقایسه با راه‌حل‌های کلاسیک

راه‌حل متداول کلاسیک	مزیت IPC نسبت به راه‌حل‌های کلاسیک	کاربرد
استفاده از لینک HVDC	عدم تولید هارمونیک عدم مصرف (جذب) توان راکتیو مقاوم بودن نسبت به تغییر شرایط	اتصال دو سیستم آسنکرون
ترانس شیفت دهنده فاز یا PST	کنترل قدرت راکتیو جلوگیری از افزایش سطح اتصال کوتاه و محدودسازی جریان خطا	اتصال دو سیستم سنکرون
طراحی مجدد سیستم با ترانس	کاهش هزینه عملکرد انعطاف‌پذیر	افزایش ظرفیت
ترانس شیفت دهنده فاز یاPST	کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو[12] کاهش هزینه کاهش تلفات	کنترل سیلان توان

[10] Power Flow Control

[11] Fault current limitation

[12] Independently control the active and reactive power flows

کنترل‌کننده توان میان فاز به خاطر داشتن قابلیت‌های جذاب و توپولوژی‌های مختلف، همواره به‌عنوان یکی از تجهیزات چندکاره مورد توجه محققان و مهندسان قدرت است.یکی از دلایل اصلی توسعه فن‌آوری کنترل‌کننده توان میان فاز (IPC)،که در بخش بعدی آن را بررسی می‌کنیم، ساخت کنترل‌کننده‌های پخش‌بار جدید برای غلبه بر محدودیت‌های ناشی از سطوح اتصال کوتاه بالا در بهره‌برداری از سیستم و پیدا کردن راه‌حلی پسیو برای حل مشکلات فرکانس پایه و کاهش تلفات شبکه است.

ذکر این نکته ضروری است که استفاده از IPC به‌عنوان یک کنترل‌کنندهٔ پخش‌بار جدید و یک راه‌حل پسیو و نوآورانه در سیستم قدرت، علاوه بر کاهش تلفات و کاهش هزینه‌ها تولید برق، به‌طور هم‌زمان موجب ارائه قابلیت‌هایی دیگر این کنترل‌کننده نظیر محدودسازی جریان خطا، می‌شود و از این طریق انعطاف‌پذیری سیستم را نیز افزایش می‌دهد.

در تقسیم‌بندی فناوری‌های IPC، از سه جنبه مختلف می‌توان آن‌ها را موردبحث و بررسی قرارداد [۲۲].

۱. بر اساس نوع جابجا گر فاز

۲. بر اساس طبیعت شاخه‌های آن

۳. بر اساس مدار رزونانس

کنترل‌کننده میان فاز قدرت را برحسب نوع جابه‌جاگر فاز می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی کرد: [۲۳].

- دسته اول گروهی را شامل می‌شود که از اتصال متقاطع فازها یا ترانس‌هایی با سربندی ستاره یا مثلث برای ایجاد انتقال فاز ثابت $\pm ۱۲۰^{\circ}$ یا $\pm ۶۰^{\circ}$ استفاده می‌کنند.
- دسته دوم که IPC تزریق ولتاژ نامیده می‌شوند از ترانسفورماتور جابه‌جاگر فاز برای تغییر فاز ولتاژها بهره می‌برند.
- دسته سوم از مبدل‌های الکترونیک قدرت به‌جای ترانسفورماتورهای جابه‌جاگر فاز استفاده می‌شود.

بر اساس این تقسیم‌بندی، اولین ایده در زمینه نسل سوم IPCها، در سال ۲۰۰۸ در [۲۴] ارائه شد. در این مرجع از یک مبدل پشت‌به‌پشت برای تولید جابه‌جاگر فاز الکترونیک قدرت استفاده‌شده است. بهره‌گیری از مبدل‌های الکترونیک قدرت علاوه بر تسریع پاسخ دینامیکی سیستم سبب می‌شود که ساختار اخیر نسبت به دو نسل قبلی از قابلیت بالاتری در کنترل مجزای توان حقیقی و راکتیو برخوردار باشد.

در تقسیم‌بندی IPC به لحاظ مدار رزونانس،اگر اندازه X_L وX_C در فرکانس پایه شبکه، یکسان تنظیم شود سلف و خازن یک مدار رزونانس را تشکیل می‌دهند. در این حالت IPC حاصل را IPC تنظیم‌شده[۱۳] می‌گویند. IPC تنظیم‌شده تنها دو پارامتر قابل‌کنترل شامل زوایای فیزشیفتر φ_1 وφ_2 برای کنترل مستقل سیلان توان اکتیو و راکتیو را دارد. چنین توپولوژی از IPCبرای کاربردهای کاهش جریان اتصال کوتاه مناسب است تا در مقابل جریان اتصال کوتاه، امپدانس بی‌نهایت نشان دهد. در IPC تنظیم‌شده هر یک از ترمینال‌های آن نظیر یک منبع جریان وابسته به ولتاژ عمل می‌کند و خاصیت مجزا سازی منحصربه‌فردی را برای IPC ایجاد می‌کند. به‌طوری‌که در حالت خطا،جریان اتصال کوتاه را از یک سمت به سمت دیگر منتقل نمی‌کنند [۲۲،۷-۵].

ازآنجاکهIPC از دوشاخه موازی تشکیل‌شده است با توجه به کاربرد IPC طبیعت شاخه‌های آن‌هم می‌تواند متغیر باشد و درنتیجه IPC می‌تواند دارای توپولوژی‌های مختلفی باشد. هر توپولوژی از توپولوژی‌های IPC، نیز با توجه به نوع کاربرد و ساختار خود دارای نامی می‌باشد [۲۲،۷-۵].در بخش بعدی توپولوژی‌های گوناگون IPC را مورد بحث و بررسی قرار می‌دهیم.

[13] Tuned IPC

۴. توپولوژی‌های گوناگون IPC

برخلاف سایر ادوات FACTS که اکثراً دارای یک نوع توپولوژی هستند IPC دارای توپولوژی مختلفی است. وجود چهار پارامتر قابل کنترل در ساختمان IPC (دو امپدانس و دو فیزشیفتر) اجازه انعطاف‌پذیری بسیار زیادی را در طراحی آن ایجاد می‌کند و کاربردهای متنوعی را امکان‌پذیر می‌سازد. در ساختار IPC هرکدام از چهار المان مذکور می‌توانند صورت‌های گوناگونی داشته باشند. به‌طور مثال هرکدام از ترانس‌های شیفت دهنده فاز می‌توانند ترانس‌های شیفت دهنده فاز معمولی یا استاتیکی باشند و یا هرکدام از المان‌های راکتیو موجود در ساختار IPC مثلاً می‌توانند TCR و یا TCS باشند [۲۲-۲۱].وجه تمایز IPC از دیگر تجهیزات جبران ساز سری، روشی است که در آن قطعات سری به شبکه‌ها متصل شده‌اند. بر همین مبنا، توپولوژی‌های مختلفی برای IPC بسته به کاربرد آن در شبکه و نحوه تولید اختلاف‌فاز در آن مطرح‌شده است. در ادامه بحث، برخی از این توپولوژی‌ها را معرفی می‌کنیم.

اتصال دکوپله (DI)[14]: که در آن امپدانس‌های سلفی و خازنی موازی، در فرکانس پایه شبکه یک مدار تشدید را تشکیل می‌دهند. لذا هر پایانه DI در فرکانس پایه به‌صورت یک منبع جریان کنترل‌شده رفتار می‌کند.DI در شرایط نرمال، کنترل پخش‌بار دوطرفه و پشتیبانی ولتاژ را از طریق تولید و جذب توان راکتیو و با تنظیم فیزشیفترها تأمین می‌کند. در زمان بروز خطا، DI، اغتشاش را از یک سمت خود به سمت دیگر انتقال نمی‌دهد [۲۵].

ترانس محدودکننده جریان خطا (FCLT): هنگامی‌که یک DI ارتباط‌دهنده دو سطح ولتاژ با ترانس‌های معمولی موازی است، ترانس محدودکننده جریان خطا (FCLT) نامیده می‌شود. در FCLT یک ولتاژ جابجا شده فازی به‌صورت سری با یک امپدانس خازنی به کار گرفته می‌شود. امپدانس FCLT حدود سه برابر امپدانس اتوترانسفورماتور است و به همین دلیل دارای یک‌سوم جریان خطایی است که توسط اتوترانسفورماتور تأمین می‌شود لذا تلفات کمتری دارد. هدف FCLT افزایش ظرفیت انتقال یک پست بدون افزایش سطح اتصال کوتاه آن است. FCLT بازه‌ی کنترل تغییر فاز را افزایش می‌دهد و در مقایسه با روش تقسیم باس که برای مقابله با افزایش جریان خطا، به کار می‌رود FCLT که قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری بیشتری دارد، افت ولتاژهای حالت پایدار و گذرای کوچک‌تری را نشان می‌دهد، جبران سازی شنت کمتری نیاز دارد و نیازی به توزیع مجدد بارها پس از اغتشاش ندارد. [۲۵].

ترانس کمکی شیفت دهنده فاز (APST): در APST به‌منظور افزایش توان قابل‌انتقالِ ترانس شیفت دهنده فاز از یک سلف و خازن به‌صورت موازی با ترانس شیفت دهنده فاز، استفاده می‌شود.APST دسته‌ای از IPCها است که شامل یک ترانسفورماتور جابجا کننده فاز (PST) با امپدانس راکتیو موازی است.این امپدانس موازی شده بخش کوچکی از پخش توان را متحمل می‌شود تا قابلیت پخش بار افزایش یابد. [۲۵].

کنترل‌کننده‌ی یکپارچه توان میان فاز (UIPC): یک شکل ساختاری جدید برای IPC است که در آن PSTها با VSCها جایگزین می‌شوند. UIPC تمامی قابلیت‌های IPC و UPFC ازجمله کنترل پخش توان، محدود کردن جریان خطا، ایزولاسیون ولتاژ و تنظیم ولتاژ باس محلی را به‌طور هم‌زمان داراست. بعلاوه UIPC بازه‌ی تغییرات توان‌های اکتیو و راکتیو و بازه‌ی متغیرهای کنترل IPC را به‌طور مؤثری افزایش می‌دهد و درنتیجه دامنه‌ی کنترل توان آن را توسعه می‌بخشد.UIPC همانند UPFC می‌تواند پخش توان خط و همچنین اندازه‌ی ولتاژ در باس محلی را کنترل کند و همانند IPC جریان خطای باسی که به آن متصل است را محدود نماید. به‌عنوان نتیجه این تحقیق می‌توان گفت که UIPC به‌طور هم‌زمان مزیت‌های IPC و UPFC را داراست. تنها ایرادی که برای این نوع از IPC وجود دارد این است که یک تجهیز FACTS نسبتاً گران به‌حساب می‌آید. UIPC در مقایسه با UPFC در هر فاز یک مبدل اضافی و هزینه‌های اضافی سلف و خازن دارد و این باعث می‌شود که UIPC در مقایسه با UPFC هزینه‌های بیشتری را به خود اختصاص دهد [۵].

[14] decoupling interconnector

کنترل‌کننده‌ی توان میان فاز استاتیک (SIPC)[15]: در این ساختار، ترانسفورماتورهای جابجا کننده فاز (PST) مربوط به IPC با مبدل‌های منبع ولتاژ (VSC) نظیرSSSC جایگزین می‌شوند. SIPC نه‌تنها همه قابلیت‌های IPCهای رایج نظیر کنترل پخش‌بار، محدودسازی جریان خطا و ایزوله سازی ولتاژ را دارد، بلکه می‌تواند مقدار خطای کنترل را به مقدار صفر برساند. بعلاوه SIPC ،محدوده تغییرات متغیرهای کنترلی IPC نظیر زوایای فازها را افزایش می‌دهد که درنتیجه آن، محدوده تغییرات توان‌های اکتیو و راکتیو افزایش می‌یابد. نویسندگان [۱،۶] این نوع از IPC را IPC- VSC نامیده و ادعا کرده‌اند که IPC– VSC علاوه بر حفظ خصوصیات IPC، بسیاری از معایب آن را برطرف کرده است. علاوه بر آن زمانی که نوسانات ولتاژ و تغییر زاویه فاز بین دو منبع باعث تغییرات توان اکتیو ورودی می‌شود توان اکتیو خروجی را به‌صورت مطلوب کنترل می‌کند [۲۳،۷-۶].

IPC کنترل شونده با تریستور (TC-IPC): در این ساختار، PSTهای معمولی با PSTهای استاتیکی جایگزین شده‌اند.-PSTهای استاتیکی سرعت عملکرد بالایی دارند.TC-IPC تنظیم‌شده دارای دو پارامتر کنترلی زوایای فیزشیفتر است؛ که علاوه بر دارا بودن تمام قابلیت‌های IPC دارای خاصیت میرا سازی نوساناتِ فرکانسْ کمِ سیستم قدرت است. [۲۶].

کنترل‌کننده‌ی توان میان فاز جدید بر اساس مبدل چند سطحی پل H متوالی:

مبدل‌های چند سطحی، مبدل‌هایی با قابلیت برگشت توان هستند که یکی از کاربردهای آن‌ها، ادوات FACTS است؛ و دارای سه نوع توپولوژی اصلی شامل، مبدل پل H متوالی، مبدل دیود کلمپ و مبدل با خازن‌های شناور می‌باشند. مبدل پل H متوالی دارای قابلیت‌هایی است که آن را نسبت به دو نوع آرایش دیگر این مبدل‌ها متمایز می‌کند ازجمله این‌که، نیازی به دیودها و خازن‌های اضافی ندارد و به ازای ظرفیت توان برابر، به کمترین میزان عناصر قدرت نیاز دارد و متعادل‌سازی ولتاژ خازن‌های لینک DC آن آسان‌تر است. بر همین مبنا در کنترل‌کننده جدید، در هر شاخه IPC ولتاژ تزریقی مطلوب با ترکیب سری ماژول‌های پلH و استفاده از یک ترانسفورماتور که اولیه آن می‌تواند به‌صورت ستاره یا مثلث بسته شود، به سیستم تزریق می‌گردد. ولتاژ DC ایزوله برای اینورترهای سری از طریق یکسوسازهای پل دیودی فراهم می‌شود. این نوع از IPC از ایجاد تنش بر پروفیل ولتاژ در شبکه جلوگیری می‌کند [۲۳].

از یک دیگاه دیگر می‌توان توپولوژی‌های مختلف IPC را بطورکلی به دو نوع تنظیم‌شده و تنظیم‌نشده[16] تقسیم‌بندی کرد که قبلا در بخش سوم در مورد آن بحث کردیم [۲۷].

۵. استراتژی‌های کنترلی حاکم بر IPC

بر اساس نتایج ارائه شده در [۲۷،۷-۶].،ازآنجاکه IPC دارای پارامترهای کنترلی راکتانس و زاویه فاز است بر این اساس دو استراتژی کنترلی مختلف برای IPC شامل استراتژی کنترل راکتانس[17] و استراتژی کنترل فیزشیفتر[18] وجود دارد

۱.۵. استراتژی کنترل راکتانس

در استراتژی کنترل راکتانس، زوایای فیزشیفتر ثابت هستند. سطوح راکتانس مختلف پخش بارهای اکتیو مختلفی را منجر می-شود. مشکل اساسی این استراتژی افزایش نسبی افت ولتاژ روی راکتانس‌هاست که افزایش مقادیر مجاز راکتانس را در پی دارد [۲۷،۷-۶]. کنترل مناسب و دقیق راکتانس‌ها، نیاز به تعداد زیادی المان و کلید دارد که می‌تواند ازنظر میزان فضای اشغالی و هزینه مصرفی، تأثیر بسزایی داشته باشد.

[15] Static Interphase Power Controller
[16] UnTuned IPC
[17] reactance control strategy
[18] Phase Angle Control strategy

۲.۵. استراتژی کنترل فیزشیفتر

استراتژی کنترل فیزشیفتر (راکتانس‌ها برابر) بر تغییرات زاویه فاز ناشی از تزریق ولتاژ استوار است. تغییرات زاویه فاز با تغییر وضعیت تپ‌چنجرها ، از طریق تزریق ولتاژی که بر ولتاژ ورودی عمود است ایجاد می‌شود[۷،۲۷-۶].

در این استراتژی کنترلی،تغییر میزان توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط به کمک تغییر زوایای شیفت فازی صورت می‌گیرد. این روش به دلیل اینکه به لحاظ قیمت و میزان فضای اشغال‌شده مقرون‌به‌صرفه می‌باشد و همچنین امکان تنظیم دقیق در شرایط دلخواه را دارد روش بسیار جالبی به نظر می‌رسد[۷،۲۷-۶].

پورحسین و همکارانش در [۶] برایIPC تنظیم‌شده استراتژی کنترلی جذابی را ارائه کرده‌اند که بر مبنای آن کنترل توان‌های اکتیو و راکتیوخروجیIPC و درنتیجه کنترل توان ظاهری خروجی آن بر مبنای کنترل هم زمان متغیرهای α و β خواهد بود. α و β نیز متغیرهای مستقلی برحسب پارامترهای کنترلی IPC تنظیم شده که همان زوایای فیز شیفتر φ_1 و φ_2 هستند می باشند.

۶. نتیجه‌گیری

یکی از روش‌های ارائه شده برای این که بتوان بدون احداث خطوط جدید از ظرفیت واقعی سیستم انتقال استفاده کرد.بکارگیری ادوات FACTS است. بر همین مبنا، توجه این مقاله نیز بر یکی از جدیدترین تجهیزات FACTS به نام کنترل‌کنندهٔ توان میان فاز (IPC) متمرکز شده است.در این تحقیق سعی شده است که صرفا با گردآوری مطالعات انجام شده در زمینه IPC ،این کنترل کننده را به صورت مفصل بررسی کنیم.IPC تجهیز FACTS نوع سری چندکاره است که در ساختمان آن از تجهیزات مرسوم مانند خازن،سلف،ترانس شیفت دهنده فاز و قطع کننده‌های مدار استفاده می‌شود. و دارای قابلیت‌های جذابی نظیر کنترل مستقل سیلان توان‌های اکتیو و راکتیو، محدودسازی جریان خطا و ایزولاسیون ولتاژ[19] است.با توجه به قابلیت‌های مختلف IPC و متناسب با نوع کاربری، توپولوژی‌های مختلفی نیز برای آن، ارائه‌شده است. این در حالی است که سایر ادوات FACTS هرکدام فقط یک نوع توپولوژی دارند.داشتن توپولوژی‌های مختلف با قابلیت‌های متنوع، IPCرا به یکی کارآمدترین و مؤثرترین ادوات FACTS تبدیل کرده است.

IPC دارای دو پارامتر کنترلی شامل راکتانس و زاویه فاز است بر اساس این پارامترهای کنترلی،محققان دو استراتژی کنترلی مختلف را برای IPC شامل استراتژی کنترل راکتانس و استراتژی کنترل فیزشیفتر ارائه کرده‌اند.

در استراتژی کنترل راکتانس(زوایای فیزشیفتر ثابت). سطوح راکتانس مختلف پخش بارهای اکتیو مختلفی را منجر می‌شود. در این حالت IPC تنظیم‌نشده است اما استراتژی کنترل فیزشیفتر (راکتانس‌ها برابر) بر تغییرات زاویه فاز ناشی از تزریق ولتاژ استوار است.در این حالت IPC تنظیم‌شده است و کنترل توان‌های اکتیو و راکتیوخروجیIPC و درنتیجه کنترل توان ظاهری خروجی آن بر مبنای کنترل هم زمان متغیرهای فیزشیفتر خواهد بود.

۷. منابع

۱. جورابیانم،قره‌پتیان‌گ، و میرعباسی‌د.(۱۳۸۹) ، «سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر (FACTS) مفاهیم و کاربردها» انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، چاپ اول .

2. Hingorani, N.G and Gyugyi, L. (2000). Understanding FACTS - Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. Wiley-IEEE Press eBook Chapters, 1 – 35.

۳. نجفی ب، پورحسین ج و اسلامی س. (۱۳۹۵)«مروری بر تکنولوژی کنترل‌کنندهٔ توان بین فازی (IPC)» هشتمین کنفرانس ملی مهندسی برق و الکترونیک ایرانICEEE08 ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد.گناباد،۲۷-۲۸ مرداد.

[19] Voltage isolation

4. Brochu,J. Pelletier, P. Beauregard, F .and Morin, G. (1994) "The interphase power controller: a new concept for managing power flow within AC networks," IEEE Transactions on Power Delivery,vol.9,.833-841.

5. Pourhossein, J. Gharehpetian, G. and S. Fathi, H .(2012) "Unified Interphase Power Controller (UIPC) Modeling and Its Comparison With IPC and UPFC, " IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 27,. 1956-1963.

6. Pourhossein, J .Gharehpetian, G .and Fathi, S. (2012) "Static Inter-Phase Power Controller (SIPC) modeling for load flow and short circuit studies,"Energy Conversion and Management,vol. 64, 145-151.

7. Pourhossein, J .Gharehpetian, G .and Fathi, S, (2014) "Static Inter-Phase Power Controller Modeling and Its Comparison with IPC and SSSC,"6th Iranian conference on Electrical and Electronics Engineering, ICEEE06. Gonabad, Iran, Aug. 19-21.

8. Farmad, M.Farhangi, S. Afsharnia, S. and Gharehpetian, G. (2006) "An efficient algorithm for determining the values of elements of interphase power controller as a fault limiter," IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 1493 – 1497.

9. Beauregard, F. Brochu, J.Morin, G. and Pelletier, P (1994) "Interphase power controller with voltage injection, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, 1956-1962.

10. Habashi , K . Lombard, J. Mourad, S. Pelletier, P. Morin, G. Beauregard, F and Brochu, J .(1994)"The design of a 200 MW Interphase Power Controller prototype IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, 1041 - 1048.

11. Brochu, J. Beauregard, F.Morin, G and Pelletier, P. (1995) "Interphase Power Controller adapted to the operating conditions of networks", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, 961 - 969.

12. Brochu, J. Beauregard, F. Lemay, J. Morin, G. Pelletier, P and Thallam, R. S. (1997) "Application of the interphase power controller technology for transmission line power flow control", IEEE Transactions on Power Delivery. , vol. 12, 888 - 894.

13. Brochu, J. Beauregard, F. Morin, G . Lamay, J. Pelletier, P and Kheir, S. (1998) "The IPC technology-a new approach for substation updating with passive short-circuit limitation", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, 233 - 240.

14. Sybille, G. Haj-Maharsi. Y. Morin, G. Beauregard, F. Brochu, J. Lemay, J and Pelletier, P. (1996) "Simulator demonstration of the interphase power controller technology", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, 1985 - 1992.

15. Lemay, J. Berube, P. Brault, M. M. Gvozdanovic, M . Henderson, M. I. Graham, M. R. Smith, G. E. Hinners, R. F. Kirby, L. R. Beauregard, F and Brochu , J. (1999) "The Plattsburgh Interphase Power Controller", IEEE Transmission and Distribution Conference. vol. 2, 648 - 653.

16. Menzies, D.F. Monteiro,A.M. Senior ,J and Pedroso ,S. (2005) "A feasibility study for conversion of 345/138 Kv auto-transformers into fault current limiting transformers", International Conference on Power Systems Transients (IPST´05), Montreal, Canada, June 19-23.

17. Li,J and Chen,X. (2011) , "Regulating system power flow by IPC " International Conference on Electrical and Control Engineering, 1157 - 1160.

18. Khorrami, M . Naderi, M.S and Khalil nejad, N. (2010) "Using Interphase Power Controller to Control the ShortCircuit Level in Transmission Power Network" International Conference on Power System Technology, 1 – 6.

19. Satyanarayana Rao, R. V. V and Reddy,S.R.(2014) "Modelling and Simulation of 14 Bus System with TC – IPC " International Conference on Smart Electric Grid (ISEG), 1 – 5.

20. Mohammadi, M and Gharehpetian,G.B. (2004) "Thyristor controlled interphase power controller modeling for power system dynamic studied" IEEE Region 10 Conference TENCON. vol. 3. 355 - 358.

۲۱. فرمد م. فرهنگی ش. افشارنیا س، و قره‌پتیان گ.(۱۳۸۶) ، «طراحی و انتخاب کنترل‌کننده توان میان فاز برای محدود کردن سطح اتصال کوتاه در شبکه ایران» پانزدهمین کنفرانس مهندسی برق ایرانICEE15 ، تهران - مرکز تحقیقات مخابرات ایران،۱-۲ اردیبهشت.

۲۲. دامکی علی آبادع ، قره‌پتیان گ ،کراری م، و محمدی م.(۱۳۸۶)«ارائه روشی ساده برای جایابیIPC در خطوط رابط نواحی مختلف شبکه همراه با در نظرگیری مسئله محدودسازی سطح اتصال کوتاه» بیست و دومین کنفرانس بین‌المللی برقPSC22 ، تهران - شرکت توانیر، پژوهشگاه نیرو،۲۸-۳۰ آبان.

۲۳. عامری م.ح، و فرهنگی ش.(۱۳۹۰) ، «استفاده از جبران‌کننده سنکرون استاتیکی سری در کنترل‌کننده میان فاز» نوزدهمین کنفرانس مهندسی برق ایرانICEE19 ، تهران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر،۲۷-۲۹ اردیبهشت.

۲۴. صمدی ا، فرهنگی ش، و افشار نیا س. (۱۳۸۷) ، «کنترل‌کننده توان میان فاز جدید بر اساس مبدل چند سطحی پل H متوالی» شانزدهیمن کنفرانس مهندسی برق ایرانICEE16 ، تهران - دانشگاه تربیت مدرس،۲۴-۲۶ اردیبهشت.

25. Lemay, J.Brochu, J.Beauregard, F. and Pelletier, P. (2000) "Interphase Power Controllers complementing the family of FACTS controllers, " IEEE Canadian Review – Spring, ABB Review. 65-71.

۲۶. محمدی م. قره‌پتیان گ، و رستگار ح.(۱۳۸۳) ، «مدل‌سازی و کاربرد TC- IPC برای میرا سازی نوسانات فرکانس کم»نوزدهمین کنفرانس بین المللی برقPSC19،تهران- شرکت توانیر, شرکت متن،۲-۴ آذرماه.

۲۷. دامکی علی آباد ع. (۱۳۸۶) ، مدل‌سازی تبادل توان بین دو شبکه ناهمسان با خط رابط مجهز به IPC. ، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر،تهران.