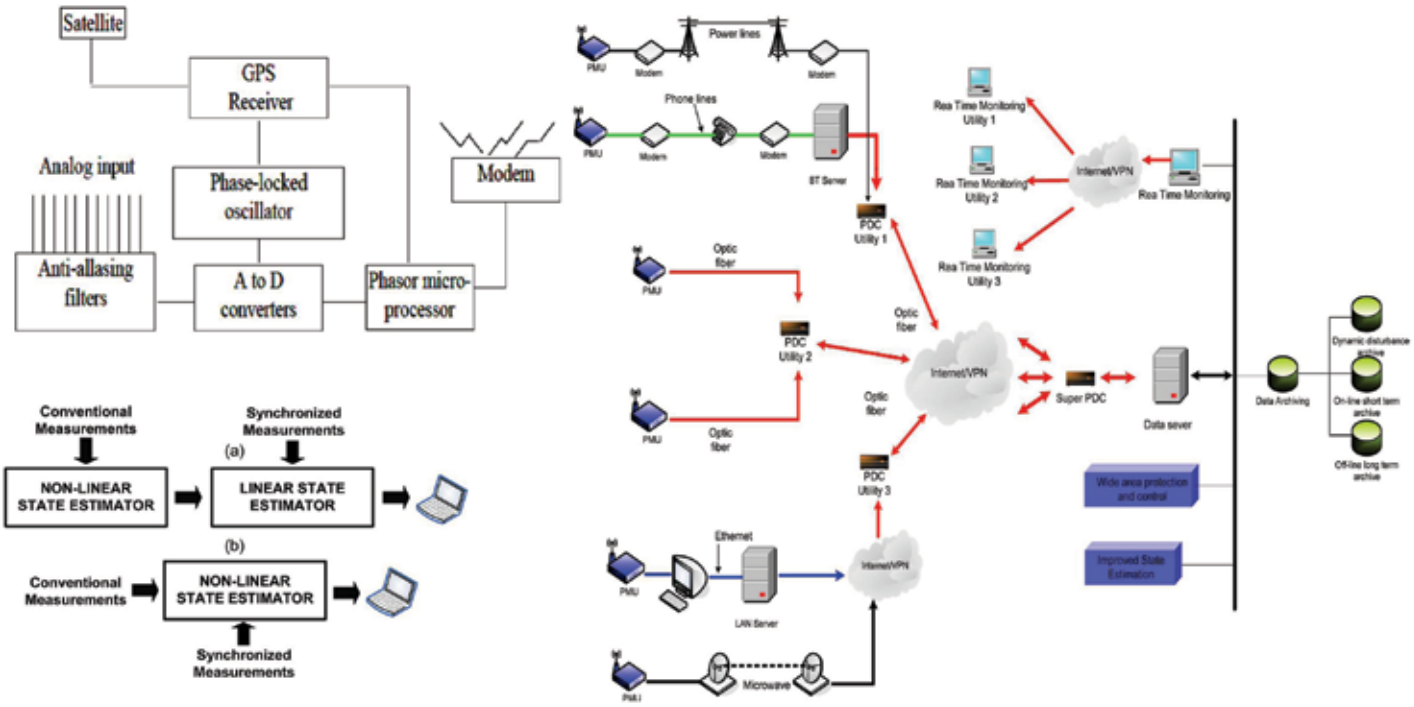


به‌کارگیری قابلیت‌های سیستم اندازه‌گیری، حفاظت و کنترل گسترده (WAMPAC) در بهبود امنیت شبکه انتقال

حسین برزوئی/دانشگاه صنعتی سجاد/شرکت برق منطقه‌ای خراسان
hs.borzuee@gmail.com

مصطفی رجبی مشهدی/دانشگاه صنعتی سجاد/شرکت مدیریت شبکه برق ایران
m.rajabimashhadi@ieee.org

چکیده

در این مقاله سامانه اندازه‌گیری، حفاظت و کنترل گسترده (WAMPAC) معرفی شده و قابلیت‌های آن در بهبود پایداری و امنیت شبکه انتقال مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این راستا اجزای اصلی و فعال‌کننده سامانه WAMPAC از جمله واحد اندازه‌گیری فازور(PMU) به طور اجمالی توصیف خواهد شد. از مهم‌ترین قابلیت‌های سامانه WAMPAC می‌توان به کنترل و پایش بلادرنگ سیستم قدرت، تخمین حالت و کمک به بازیابی سیستم قدرت اشاره کرد که نقش بسزایی در پیشگیری از خاموشی‌های گسترده و منطقه‌ای خواهد داشت.

کلمات کلیدی: WAMPAC، PMU، امنیت سیستم قدرت، خاموشی گسترده، تخمین حالت

۱-مقدمه

سیستم قدرت بزرگ‌ترین سیستم پیچیده ساخته بشر است. برخی از پدیده‌های ایجاد شده در این سیستم پیچیده را نمی‌توان با ابزارهای موجود نظیر سامانه‌های اسکادا و EMS و همچنین سیستم‌های حفاظتی سنتی شناسایی و در زمان واقعی اقدامات اصلاحی را تعیین و اجرا نمود. در این سامانه‌ها امکان پایش بلادرنگ زاویه بین دو ناحیه که نقش تعیین کننده‌ای در پایداری سیستم قدرت دارد وجود ندارد. چراکه سامانه اسکادای کنونی نمی‌تواند به‌طور مستقیم زاویه را اندازه‌گیری نماید[۱].

در سال‌های اخیر سیستم‌های اندازه‌گیری ناحیه گسترده (WAMS) در سراسر دنیا توسعه‌یافته و پیوسته به لحاظ کارایی در حال ارتقاء می‌باشند. همچنین با وقوع چند خاموشی سراسری تمایل زیادی نسبت به پیاده‌سازی سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده، کنترل و آنالیز حوادث ایجاد گردید. اجرای این سیستم از یک دهه قبل شروع شده و با وقوع چند خاموشی سراسری در شبکه قدرت شتاب گرفته است و در سراسر دنیا در حال توسعه و اجرا می‌باشد.

بهره‌برداران سیستم قدرت تلاش می‌کنند سیستمی طراحی نمایند که علاوه بر داشتن قابلیت اطمینان بالا، به خوبی بتواند از عهده حوادث احتمالی شبکه برآید. حتی در مورد سیستم‌هایی که خوب طراحی شده‌اند، رخدادهای غیرقابل پیش‌بینی می‌تواند سیستم را تحت فشار قرار دهد و باعث شود تا سیستم از قیود و محدودیت‌های خود عبور نماید[۲].

عموماً اغتشاشات، منطقه وسیعی از سیستم قدرت را در بر می‌گیرند. برای جلوگیری از اغتشاشات پر خطر، برنامه‌ریزی دقیق برای حفاظت و کنترل اضطراری در شبکه گسترده قدرت امری ضروری است.

در این مقاله در بخش دوم، واحدهای اندازه‌گیری فازوری معرفی شده است. سپس در بخش سوم اجزای سیستم WAMPAC توصیف می‌گردد و به کاربردهای آن در بهبود امنیت شبکه انتقال اشاره می‌شود. و در بخش چهارم به طور اجمالی روند تحقیق و توسعه سیستم WAMPAC معرفی و در نهایت در بخش پنجم مطالب جمع‌بندی و نتیجه‌گیری شده است.

۲-معرفی واحد اندازه گیری فازور(PMU[1]) به‌عنوان بخش اصلی و فعال کننده سیستم WAMPAC[2]

PMUها یا واحدهای اندازه‌گیری فازروهای هم‌زمان ولتاژ و جریان،

تجهیزات با سرعت نمونه‌برداری بالا در سیستم قدرت می‌باشند که اطلاعات مقادیر را به‌صورت هم‌زمان شده و بلادرنگ شامل فازورهای ولتاژ و جریان اندازه‌گیری می‌نمایند. از این اطلاعات می‌توان برای محاسبه دامنه، فاز جریان و ولتاژ و همچنین پخش بار توان اکتیو و راکتیو استفاده کرد. هم‌زمان‌سازی توسط نمونه‌گیری همزمان شکل موج جریان و ولتاژ در نقاط مختلف شبکه صورت می‌گیرد. توسط PMU ها می‌توان یک تصویر[۳] از سیستم قدرت تهیه نمود. توسعه فن‌آوری PMU جهت کاهش خاموشی‌ها و آنالیز رفتار بلادرنگ سیستم قدرت بسیار مهم می‌باشد. استاندارد IEEE C37.118 در خصوص واحدهای اندازه‌گیری همزمان فازوری می‌باشد و در زمینه چگونگی اندازه‌گیری زاویه فاز با توجه به یک مرجع زمانی و همچنین چگونگی ارایه گزارش اطلاعات فازوری تدوین شده است. این اطلاعات جهت توسعه شبکه انتقال هوشمند (SRG[۴]) و سیستم کنترل منطقه وسیع (WACS[۵]) و سیستم حفاظت منطقه وسیع (WAPS[۶]) و کاربردهای آنها بسیار مفید است[۱].

۲-۱-تاریخچه استفاده از PMU

در سال ۱۹۸۸، PMU ها برای اولین بار توسط آقایان Arun Phadke و Thorp در دانشگاه پلی تکنیک ورجینیا معرفی شد که امکان ارایه و نمایش فازورهای هم‌زمان شده جریان و ولتاژ را می‌دادند. این فازورها با توجه به سیگنال مرجع که توسط سیستم مکانیابی جهانی (GPS) تعریف می‌شود، در نقاط مختلف جغرافیایی هم‌زمان می‌شوند.

در ۱۴ آگوست سال ۲۰۰۳، خاموشی گسترده‌ای در منطقه شمال شرق امریکا منجر به خاموشی برق ۵۰ میلیون نفر و تعداد زیادی نیروگاه و تاسیسات شد. در فوریه سال ۲۰۰۴ گزارش آن انتشار یافت. در این گزارش PMU ابزار مهمی جهت رویت‌پذیری[۷] بلادرنگ در یک منطقه وسیع سیستم قدرت معرفی شده بود. بعد از آن دپارتمان انرژی آمریکا بر روی چندین پروژه، جهت توسعه PMU سرمایه‌گذاری نمود و به همین دلیل تعداد PMU های نصب شده در آمریکا از ۱۶۶ عدد در سال ۲۰۱۰ به ۱۱۲۶ عدد در سال ۲۰۱۳ رسید[۱].

تاثیرات اقتصادی و اجتماعی این حادثه به حدی بود که تحقیقات بسیار گسترده‌ای در این خصوص به لحاظ بررسی علت و چگونگی جلوگیری از ایجاد چنین رخدادهایی انجام شد[۳]. یکی از علت‌هایی که برای این حادثه ذکر شد، استفاده اپراتورهای شبکه برق از اطلاعات غیر بلادرنگ[۸] برای بهره‌برداری‌های بلادرنگ[۹] بود[۳].

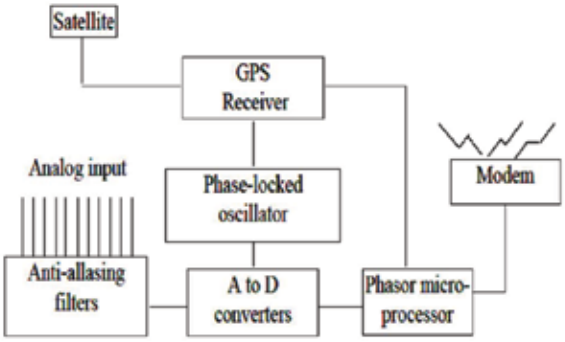
در بررسی و بازسازی مجدد سیستم در خاموشی، محققان و پژوهشگران این حادثه به تغییرات پارامتر زاویه فاز ولتاژ در سیستم قدرت به‌عنوان بخشی از اطلاعاتی که می‌تواند به اپراتور سیستم جهت تشخیص نقاط ضعیف کمک نماید، توجه‌ای ویژه‌ای داشتند. در تحلیل‌های بعد از حادثه مشخص شد که سیستم اندازه‌گیری هم‌زمان فازور، روش مناسبی برای جمع‌آوری اطلاعات می‌باشد[۳].

۲-۲-ساختمان و نحوه کارکرد PMU

با توجه به شکل (۱) سیگنال‌های آنالوگ شامل جریان و ولتاژ که توسط ترانس‌های جریان و ولتاژ ایجاد می‌شوند مراحل زیر را طی می‌نمایند تا تبدیل به فازور گردند[۱].

۲-۲-۱- فیلتر anti-aliasing

بر اساس تئوری نمونه‌برداری شانون – نایکویست، برای بازسازی سیگنال بعد از نمونه‌برداری، فرکانس نمونه‌برداری باید بزرگ‌تر از دو برابر ماکزیمم فرکانس سیگنال مورد نظر باشد. اگر نرخ نمونه‌برداری کمتر از این مقدار شود، اطلاعات بدست آمده از سیگنال مرجع نمی‌تواند به‌طور کامل قابل بازیابی باشد و منجر به پدیده alias می‌گردد. برای جلوگیری از این پدیده از فیلتر anti-aliasing استفاده می‌شود.



شکل۱: بخش‌های مختلف PMU

۲-۲-۲- مبدل آنالوگ به دیجیتال

خروجی فیلتر anti-aliasing به ورودی مبدل آنالوگ به دیجیتال داده میشود. نرخ نمونه‌گیری در این مبدل توسط نوسان‌ساز قفل فاز تامین می‌گردد. نمونه‌های دیجیتال شده از مبدل آنالوگ به دیجیتال به میکروپروسسور فازور داده می‌شود. به‌طور کلی، شش عدد مبدل A/D مورد نیاز می‌باشد. سه عدد برای ولتاژ و سه عدد برای جریان است.

۲-۲-۳- سیستم موقعیت یاب جهانی (GPS[۱۰])

GPS سیستمی است که بر اساس اطلاعاتی که ماهواره‌های فضایی در اختیار آن قرار می‌دهند، اطلاعات مکانی و زمانی اشیاء را در هر نقطه از کره زمین و در هر شرایط آب و هوایی ارایه می‌دهد. وزارت دفاع امریکا این پروژه را در سال ۱۹۷۳ آغاز نمود که توسط آن ۲۴ ماهواره در ۶ مدار جغرافیایی استفاده شد. این ماهواره‌ها اطلاعات مکانی و زمانی را ارسال می‌نمایند. گیرنده GPS با استفاده از این اطلاعات، توانایی تولید سیگنال‌هایی مانند یک پالس در ثانیه با دقت ۱ میکروثانیه را دارا می‌باشد. این سیگنال به تعداد زیادی سیگنال پالس در ثانیه جهت مجبور کردن مبدل A/D به نمونه‌گیری تبدیل می‌شود.

۲-۲-۴- اسیلاتور قفل فاز

در بسیاری از PMUها نرخ نمونه‌گیری به‌صورت مستقیم از طریق مدارات قفل فاز انجام می‌شود. اسیلاتور یا حلقه قفل فاز (PLL[۱۱]) سیگنال ورودی از فیلتر Anti-aliasing را با سیگنالی که از GPS ارسال می‌شود قفل می‌نماید. نرخ نمونه‌گیری عموماً ۱۰ کیلوهرتز برای مقاصد بسیار دقیق می‌باشد و این عدد به واسطه فیلترهای موجود کاهش می‌یابد.

۲-۲-۵- ریزپردازش فازور

وظیفه این بخش دریافت نمونه‌ها از مبدل A/D ، محاسبه مولفه مثبت جریان و ولتاژ با استفاده از الگوریتم‌های بازگشتی مانند سری فوریه و زدن برچسب زمانی توسط GPS است. در این بخش از دو روش بازگشتی و غیربازگشتی جهت محاسبه مقادیر دامنه و فاز استفاده می‌شود.

۲-۲-۶- ارتباطات

برای انتقال و دریافت داده و انواع دیگر پیام‌های تولید شده توسط PMU به مراکز جمع‌کننده فازورها (PDC[۱۲])، از شبکه‌های ارتباطی که بیشتر فیبر نوری می‌باشد استفاده می‌شود. پروتکل‌های ارتباطی، فرمت پیام‌ها را برای اطمینان از نحوه کار PMUها با مدل‌های مختلف و با PDC های مختلف را تعریف می‌نماید.

۳-کاربرد WAMPAC در بهبود امنیت شبکه انتقال

فن‌آوری اطلاعات هم زمان شده (SMT[۱۳])، به‌عنوان یک المان مهم

سیستم WAMPAC و فعال کننده این سیستم می‌باشد [۴].
با توجه به پیشرفت‌های گسترده‌ای که به‌تازگی در فن‌آوری صورت پذیرفته و روش‌های جدیدی که در سیستم‌های کنترل و حفاظت ایجاد شده است، مدل جدیدی از تجمیع‌سازی سیستم‌های حفاظت و کنترل ارایه شده است. با در نظر گرفتن فن‌آوری GPS، SMT یکی از این فن‌آوری‌ها می‌باشد. ساختمان و ساختار SMT شامل موارد ذیل می‌باشد[۴]:

۱.PMU

۲.DC : Data Concentartor

۳.AS: Application Software

۴.CNs: Communication Networks

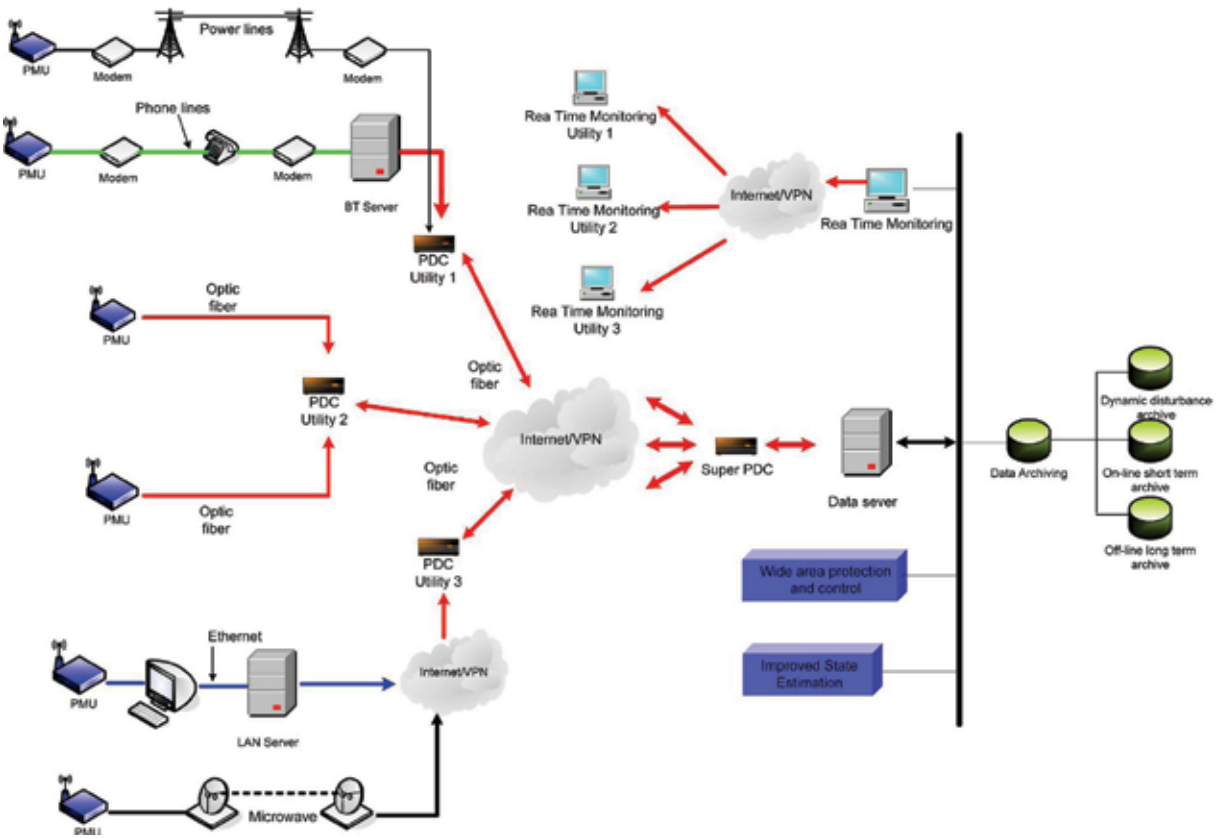
در شکل(۲)، یک نمونه از معماری سیستم WAMPAC ارایه شده است[۴]. PMUها بیشتر در باس‌ها و یا نودهای مختلف حساس و بحرانی در سیستم‌های قدرت نصب می‌شوند. نتیجه نصب آنها منجر به ایجاد استخری عظیم از داده‌های هم‌زمان شده از نقاط مختلف شبکه به همراه برچسب زمانی می‌باشد. این اطلاعات توسط تجهیزاتی به نام PDC جمع‌آوری می‌شوند.
در نهایت این داده‌های جمع‌آوری شده توسط PDCها در اختیار نرم‌افزارهای بلادرنگ جهت آنالیز سیستم قدرت قرار می‌گیرند تا بتوان انواع مختلفی از سناریوهای حفاظتی و کنترلی و یا هر کاربرد مورد نیاز دیگر را اجرا نمود[۱].
گروه‌های کاری مختلف در سراسر دنیا در حال توسعه فن‌آوری PMU جهت کاربردهای مختلف می‌باشند. از PMU در مرحله اولیه می‌توان به‌عنوان ثبات اغتشاشات سیستم استفاده نمود[۱]. نمایش اطلاعات فازوری برای اپراتور یکی از راحت‌ترین و سریع‌ترین راه‌ها جهت استفاده از PMU به‌عنوان روشی برای بهبود سیستم‌های هشداری در سیستم قدرت می‌باشد[۳].

۳-۱-ثبت رخدادهای دینامیک سیستم و آنالیز حوادث

تجربه نشان داده است، ثبت رخدادهای دینامیکی سیستم در آنالیز عملکرد سیستم و فهم رفتار آن و همچنین تعیین نوع اقدامات کنترلی در حین اغتشاشات بزرگ در یک منطقه وسیع بسیار موثر و ارزشمند است.
SMT ابزاری برای ثبت رخدادها در یک منطقه وسیع ارایه می‌نماید. همچنین نرخ داده بالا و دقتی که این فن‌آوری ارایه می‌نماید، می‌تواند امکان ثبت تغییرات سریع دینامیکی سیستم را فراهم نماید [۴] .
در مرجع [۵]، با انجام یک آزمون آزمایشگاهی، تأثیر سیستم کنترلی ناشی از WAMPAC بر روی یک خطای نمونه انجام پذیرفت. خروجی این آزمون در شکل(۳) نشان داده شده است.
همچنین در مرجع [۶]، از دانش تئوری اطلاعات و موضوعات آمار و احتمال، در آنالیز حوادث و وضعیت شبکه با استفاده از اطلاعات PMU و سیستم WAMPAC استفاده شده است.

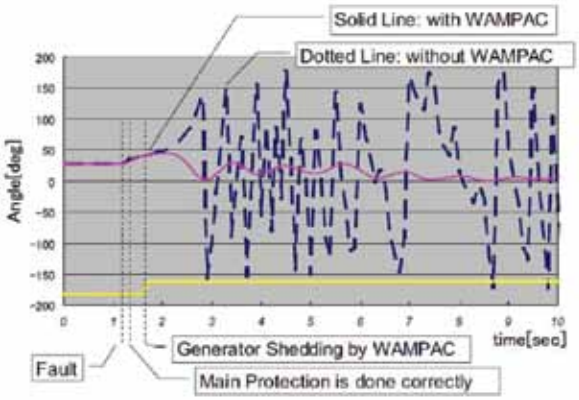
۳-۲-حفاظت سیستم قدرت

PMUها با استفاده از فرآیند هم‌زمان‌سازی مقادیر اندازه‌گیری کمک شایانی به روش‌های حفاظتی شبکه می‌نمایند. توسط آنها می‌توان شرایط غیرنرمال شبکه را تشخیص داد و با انجام عکس‌العمل مناسب در شبکه مانند ایزوله کردن خطا از خاموشی‌های گسترده جلوگیری نمود. با توجه به اینکه مکانیزم PMU یک مکانیزم مرتبط با پارامتر زمان می‌باشد (فهرستی از متغیرهای حالت به همراه برچسب زمانی) از این‌رو امکان پیش‌بینی ناپایداری‌ها و حالت‌های گذرا و همچنین اغتشاشات سیستم وجود دارد. بنابراین امکان ایجاد تصمیم‌گیری‌های



شکل ۲: نمایش اطلاعات PMUها در یک منطقه وسیع در امریکا [۴]

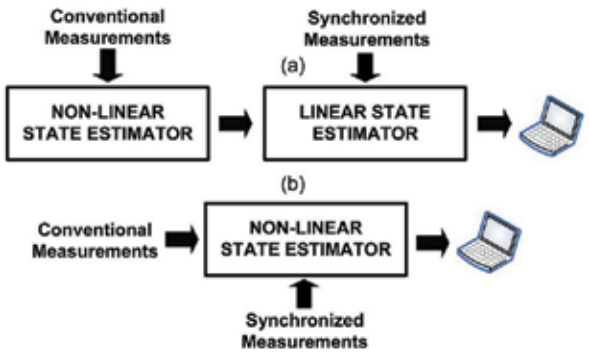
حفاظتی مناسب برای اپراتورهای سیستم فراهم می‌گردد.
با استفاده از این مکانیزم می‌توان رله‌گذاری تطبیق‌پذیر به نوعی که تنظیمات و توابع حفاظتی متناسب با شرایط سیستم تغییر نماید را انجام داد[۱].



شکل ۳ - منحنی تغییرات زاویه فاز با و بدون حضور سیستم WAMPAC [۵]

۳-۳-تخمین حالت سیستم قدرت

اغلب بخشی از اطلاعات سیستم قدرت در برخی از زمان‌ها در سیستم اسکادا صحیح نبوده و یا دستگاه‌های اندازه‌گیری خراب شده‌اند و اطلاعات به سیستم EMS ارسال نمی‌گردد. در این شرایط برای تحلیل سیستم قدرت از تخمین حالت استفاده می‌شود.
تخمین حالت سیستم، از سال ۱۹۶۰ معرفی و توسعه داده شد. استفاده از اندازه‌گیری فازور در EMS، سطح بالایی از دقت را در تخمین حالت ایجاد می‌نماید و در مواقعی که پایانه راه دور قطع می‌باشد امکان اندازه‌گیری از طریق PMUها مهیا می‌شود[۱]. مراکز کنترل مدرن از تخمین حالت برای مانیتورینگ سیستم قدرت استفاده می‌نمایند. در آنها از مقادیر مختلف اندازه‌گیری که از پست‌های برق جمع‌آوری می‌شوند با استفاده از روش‌های تکراری غیرخطی تخمینی، برای محاسبه حالت سیستم قدرت استفاده می‌نمایند. در روش تخمین حالت سنتی، وضعیت سیستم با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری غیرسنکرون شده محاسبه می‌گردید. ولی با توجه به پیشرفت‌هایی که در زمینه PMU انجام شده است به جای تخمین حالت، از اصطلاح اندازه‌گیری حالت استفاده می‌شود[۱].
برای دستیابی به رویت‌پذیری کامل شبکه عموماً نیاز به آن است که در حدود یک سوم کل باس‌های شبکه PMU نصب شود. مکان نصب PMU عموماً بر اساس یک فرآیند بهینه‌سازی تعیین می‌شود. اگر تعداد کامل از PMUها نصب شود، یک زیر مجموعه کمتری از آنها می‌تواند برای رویت‌پذیری بخش‌های جزیره‌ای به کار رود. با نصب PMU در مکان‌های بهینه مناسب می‌توان نواحی رویت‌پذیری یکنواختی را طراحی نمود[۴].
بسیار مناسب و مطلوب است که اطلاعات اسکادا و PMU به‌صورت ترکیبی برای تخمین حالت به کار روند. برای این منظور می‌توان تمامی مقادیر اندازه‌گیری را در یک بردار ترکیب نمود و از تخمین‌گر غیرخطی حداقل مربعات خطا برای حل مساله استفاده نمود. در شکل (۴) خلاصه‌ای از انواع ترکیبی تخمین حالت با استفاده از اطلاعات اسکادا و اطلاعات همزمان شده نمایش داده شده است [۴].
با استفاده از مفهومی که در تخمین‌گرهای پارامتر (PE[۱۳]) امروزی و مرسوم وجود دارد، پارامترهای خطوط سیستم انتقال می‌توانند توسط مقادیر اندازه‌گیری موجود تخمین زده شوند. جهت دقیق‌تر شدن نتایج نیازمند سطح بالایی از اطلاعات مقادیر اندازه‌گیری و به همراه دقت مناسبی از آنها می‌باشد. با استفاده از اطلاعات PMU می‌توان این نیاز را برآورده ساخت و پارامترهای ناشناخته شبکه را تخمین زد. به عبارت دیگر می‌توان گفت با استفاده از اطلاعات PMU می‌توان پروسه تخمین حالت کلی شبکه را بهبود بخشید و سپس می‌توان پارامترهای مدل شبکه را محاسبه و بروز نمود [۴].



شکل ۴:طرح تخمین حالت ترکیبی - a: تهمین حالت غیر خطی دو مرحله‌ای b: تخمین حالت غیر خطی ترکیبی[۴].

۳-۴-مدیریت تراکم بلادرنگ

مدیریت تراکم یکی از مواردی است که توسط برنامه‌ریزان شبکه قدرت در بازار برق و نیز بهره‌برداران شبکه به‌صورت بلادرنگ انجام می‌پذیرد. هدف از مدیریت تراکم، نگهداشتن و برقراری پخش توان بلادرنگ خطوط انتقال در حد ظرفیت مطمئن آنها و با هدف پخش‌بار بهینه (کم کردن هزینه‌ها) می‌باشد. اطلاعات PMU می‌تواند این کار را دقیق‌تر انجام دهد و آزادی عمل بیشتری در محاسبه مدیریت تراکم ایجاد نماید [۴].

۳-۵-مانیتورینگ زاویه فاز یا PAM[۱۴]

با استفاده از مکانیزم مانیتورینگ زاویه فاز امکان محاسبه اختلاف زاویه بین هر دو باس وجود خواهد داشت. همچنین امکان شناسایی سریع مشکلات بالقوه محلی و منطقه‌ای شبکه مهیا خواهد شد. این مکانیزم می‌تواند به کمک بهره‌برداران شبکه که هماهنگ‌کننده نواحی می‌باشند در تعیین نوع شرایط بهره‌برداری شبکه کمک نماید. علاوه بر آن می‌توان با PAM میزان اختلاف زاویه بین هر دو باس و نرخ تغییر اختلاف زاویه بین دو باس را به‌دست آورد و میزان اغتشاشات دینامیکی و حالت گذرا را شناسایی کرد [۴].

۳-۶-تخمین پارامترهای مربوط به مدل بار

به‌کارگیری مدل مطمئن و قابل اعتماد و همچنین اطلاعات دقیق از پارامترهای شبکه برای استفاده در نرم‌افزارهای شبیه‌ساز، برنامه‌ریزی و انجام اقدامات کنترلی پایدار و مقاوم، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. اما به دلیل تعداد بالای اجزاء و المان‌های شبکه و همچنین مشخصه متغیر با زمان آنها، به‌دست آوردن مدل دقیق از پارامترهای شبکه کاری بسیار دشوار و سخت می‌باشد. یکی از موضوعاتی که امروزه دنبال می‌شود، اعتبارسنجی و یا معیارسنجی[۱۵] و تنظیم خوب مدل سیستم به منظور شناسایی و تشخیص خطاهای مدل‌سازی و محاسبه مقادیر صحیح آن مدل است. استفاده از اطلاعات همزمان شده جریان و ولتاژ شبکه کمک بزرگی به شناسایی خطاهای مدل‌سازی سیستم قدرت و پارامترهای دیگر شبکه می‌نماید که این نیز تاثیر قابل توجهی در رفتار شبکه در شرایط گذرا و دایم دارد [۴].

۳-۷-اعتبار سنجی مدل ژنراتور

شـــناخت پارامترهای عملکردی ژنراتور جهت مطالعات پایداری شبکه و آنالیز پس از وقوع رخدادها بسیار مهم و موثر است. از طرفی داشتن مدل دینامیکی المان‌های سیســـتم قدرت شامل ماشین‌های سنکرون و دیگر کنترل‌کننده‌های نیروگاه برای برنامه‌ریزی و گرفتن تصمیمات مهم و موثر در بهره‌برداری بسیار مهم می‌باشد.

پارامترهای ژنراتور ممکن است با توجه به گذر زمان، اشباع مغناطیسی و تغییرات دمای کاری آن تغییر نماید. در حقیقت بســـیاری از صنایع از همان پارامترهای مدل ماشـــینی اســـتفاده می‌نماینـــد که در زمان راه‌اندازی آن محاســـبه شـــده‌اند. از این رو این امر موجب می‌شود که اختلاف زیادی بین رفتار حالت شبیه‌ســـازی و واقعیت وجود داشـــته باشـــد. هدف از اعتبارســـنجی مـــدل نیروگاه‌ها، تخمیـــن پارامترهای کنترلرهـــا جهت شناســـایی خطای تنظیمـــات، عملکرد نادرســـت و عدم‌عملکرد پایدارسازهای سیســـتم قدرت و کنترلرهای گاورنر است. PMU چنانچه در نزدیک واحد نیروگاهی نصب شود، می‌تواند اطلاعات مطمئن و قابل اعتمادی را جهت اعتبارســـنجی نیروگاه‌ها فراهم آورد. تحقیقات و مقالات بســـیار زیـــادی در خصوص تخمیـــن پارامترهای ژنراتور با استفاده از اطلاعات PMU در حال انجام می‌باشد[۴].

۳-۸-استفاده از PMU جهت طرح‌های حذف بار

یکی از کاربردهای PMU، استفاده از آن جهت اجرای طرح‌های حذف بار می‌باشـــد. به عبارت دیگر از PMU جهت برقراری پایداری سیستم استفاده می‌شود. حذف بار، در حقیقت طرح کنترلی اضطراری می‌باشد که منجر به ادامه کار سیستم در شرایط نرمال می‌گردد.

روش‌هـــای جدید حذف بار بر اســـاس فرکانس بوده که با اســـتفاده از تغییرات فرکانسی منجر به حذف بار سیستم می‌شود[۱].

۳-۹- تخمین ساختار شبکه

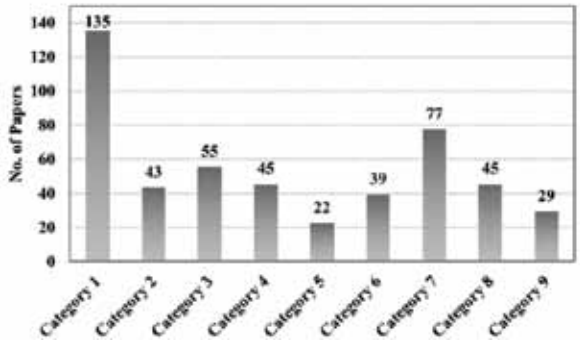
در شـــرایط اضطراری تشـــخیص دقیق وضعیت سیســـتم، کار سختی می‌باشد. اتصالات داخلی سیستم قدرت ممکن است در اثر باد، طوفان، بلایای طبیعی مختلف و حتی عوامل انسانی دچار حادثه و قطع شوند. دانســـتن اینکه کدام بخش از سیســـتم جدا شده اســـت، این امکان را برای اپراتور سیســـتم فراهم می‌آورد تا در شـــرایط اضطراری مدیریت بهتری بر روی شبکه داشته باشـــد. فازورهای همزمان شده اطلاعاتی را ارایه می‌نمایند که سیســـتم‌های اســـکادای موجود قادر به ارایه آنها نمی‌باشـــند و به اپراتور و بهره‌بردار شبکه اعتماد به نفس کافی جهت انجام فعالیت‌های کنترلی برای پایداری سیستم را می‌نماید [۳].

۴-روند توسعه سیستم WAMPAC

در مرجع شماره [۷]، مقالات مربوط به فن‌آوری اندازه‌گیری سنکرون شـــده فازوری و واحدهای اندازه‌گیری فازوری و سیســـتم اندازه‌گیری منطقه وســـیع به همراه کاربردهای آنها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در مجموع، ۴۹۰ مقاله از ژورنال‌های IEEE و IET از ســـال‌های ۱۹۸۳ تا ۲۰۱۴ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تحقیقات و پژوهش‌های انجام شده در مقالات، در ۹ حوزه ذیل دسته‌بندی شده‌اند که عبارتند از:

۱-الگوریتم‌های SMT و مسایل ساختاری PMU و WAMS
۲-معرفی عمومی PMU ، SMT و WAMS
۳-روش‌های مکان‌یابی PMU
۴-تخمین حالت بر مبنای اطلاعات PMU
۵-اعتبار سنجی مدل سیســـتم قدرت، کالیبراسیون و استخراج مدل توسط داده‌های PMU
۶-تشخیص و مکان‌یابی خطا با استفاده از داده‌های PMU
۷-پایش پایداری‌ها و دینامیک سیســـتم قدرت و پیش‌بینی سیســـتم قدرت بر اساس اطلاعات اندازه‌گیری منطقه وسیع
۸-استراتژی‌های کنترلی بر اساس اطلاعات WAMS
۹-طرح‌های حفاظتی بر اساس اطلاعات WAMS

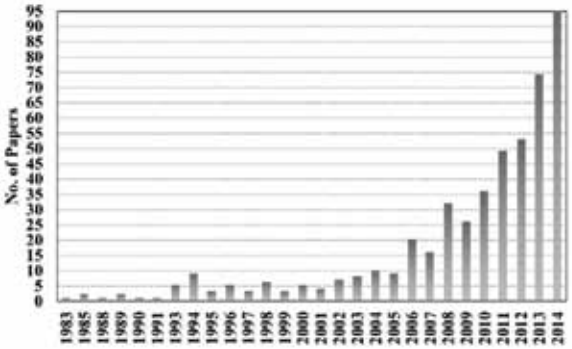
دســـته‌بندی شـــماره پنج تا نه مربوط به کاربردهـــای اطلاعات PMU می‌باشد. شـــکل (۵) توزیع مقالات را در دسته‌بندی‌های فوق نمایش می‌دهد.



شکل۵: توزیع مقالات با توجه به دسته بندی ۹ گانه[۷]

همان‌طور که در شکل(۵) مشاهده می‌شود در دسته‌بندی‌های شماره یک و هفت بیشترین مقالات مشاهده می‌شود.

در شکل (۶) توزیع مقالات متناسب با سال انتشار آنها نشان داده شده است و بیانگر افزایش نرخ مقالات در سال‌های اخیر می‌باشد .



شکل ۶: توزیع مقالات با توجه به سال انتشار آنها [۷]

۵-نتیجه گیری

در حال حاضر هزینه‌های ســـرمایه‌گذاری در سامانه‌های WAMPAC روند کاهشـــی را طی می‌کند. علاوه بر آن، سیســـتم ارتباطی سرعت بالا جهت انتقال داده از PMU به مراکز PDC بیش از گذشـــته توسعه یافته‌اند. همچنین در بیشـــتر کشورهای پیشـــرفته، راهبرد بکارگیری WAMPAC به‌عنوان یکی از اجزاء شـــبکه انتقال هوشـــمند در دستور کار قرار گرفته است.

انتظار می‌رود استفاده از سیستم اندازه‌گیری گسترده (WAM) منجر به اقدامات اصلاحی کاربردی و مطمئن بیشتری در سیستم قدرت جهت شناسائی اغتشاشات شود. اســـتفاده از کاربردهای حفاظتی و کنترلی جدید سیســـتم قـــدرت نیازمند طراحی دقیق معمـــاری WAMPAC می‌باشد. طراحی بهینه و درست معماری سیستم WAMPAC به‌عنوان گام اولیه، وابســـته به اجرای موفق سیستم SMT است. درک صحیح نیازهای سیســـتم منطقه وســـیع جهت حفاظت و کنترل، در طراحی این سیستم بســـیار تاثیرگذار است و نیازمند داشتن توابع هدف سود و هزینه می‌باشد.

در این مقاله به کاربردهای WAM در تخمین حالت، تخمین پارامترهای مدل بار، اعتبار سنجی مدل ژنراتور و برخی دیگر از کاربردهای مهم آن پرداخته شد و تحقیقات و پژوهش‌های سال‌های اخیر در حوزه SMT و WAMS مورد بررسی قرار گرفت.

پی‌نوشت‌ها

1-Phasor Measurement Unit
2-Wide Area Measurement, Protection and Control
3- Snapshot
4 - Smart Transmission Grid
5 Wide Area Control System
6- Wide Area Protection System
7- Visibility
8- Non Realtime
9- Realtime
10-Global Positioning System
11-Phase Lock Loop
12-Phasor Data Collector
13- Parameter Estimator
14- Phase angle monitoring
15-Benchmarking

منابع

[1] Mahesh k.Penshanwar and Minakshi Gavande, "Phasor measurement unit technology and its applications-A review", Conference on Energy system and applications, ICESA India, 2015
[2] M. Begovic et al. "Wide-area protection and emergency control", Proc of IEEE, vol. 93, no. 5, pp. 876-891, 2005.
[3] R.Moxley and D.Dolezilek, "Case studies: Synchrophasor WAMPAC maximizes stability and economy", Conference on Reliability of Transmission and Distribution Networks , 2011
[4] V.Terzija et al. "Wide area monitoring, protection, and control of future electric power networks", Proc of IEEE, vol. 99, no. 1, pp. 80-93, 2010.
[5] Y. Tada et al. "A hierarchical WAMPAC system: Demonstration and evaluation", IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2013
[6] Sudha Gupta et al. "Blackout risk analysis in Smart grid WAMPAC system using KL divergence approach", IEEE 6th International Conference on Power Systems, 2016
[7] F.Aminifar et al. "Synchrophasor Measurement Technology in Power Systems: Panorama and State-of-the-Art", Proc of IEEE, vol. 2, no. , pp. 1607-1628, 2014.
[8] D.Cai et al. "Roadmap for the deployment of WAMPAC in the future GB power system", IET Journals & Magazines, 2016
[9] E.Ghahremani and I.Kamwa, "Local and Wide-Area PMU-Based Decentralized Dynamic State Estimation in Multi-Machine Power Systems", IEEE Trans on Power Systems, vol. 31, no. 1,pp. 547-562, 2015
[10] R.A.Guardado and J. L.Guardado, "A PMU Model for Wide-Area Protection in ATP/EMTP", IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 31, no. 4, pp. 1953-1960, 2015
[11] P.Gopakumar et al. "Transmission line fault detection and localisation methodology using PMU measurements", IET Journals & Magazines, 2015
[12] Y.Zhau et al. "Wide-area measurement system-based transient excitation boosting control to improve power system transient stability", IET Journals & Magazines, 2015

***

ادامه از صفحه ۲۴

ies," in the Special Issue Sustainable Cities, vol. 5, Issue. 8, pp. 3328-3345, Aug. 2013.
[5] G. Windle, "What is Resilience? A Review and Concept," in Clinical Gerontology, vol. 21, Issue. 2, pp. 152-169, May. 2011.
[6] N. R. Romero, L. K. Nozick, I. D. Dobson, N. Xu and D. A. Jones, "Transmission and Generation Expansion to Mitigate Seismic Risk," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 4, pp. 3692-3701, Nov. 2013.
[۷] سعید صبوری، رسول کاظم‌زاده، هدایت صبوری، «ارزیابی میزان ریسک‌پذیری بهره‌بردار ناشی از عدم قطعیت منابع بادی و بار در مسئله در مدار قرار گرفتن واحدهای حرارتی با استفاده از شاخص ارزش در خطر شرطی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۲، ص۱۳۵-۱۴۸، تابستان ۱۳۹۵.
[8] D. A. McEntire, "Disaster Response and Recovery: Strategies and Tactics for Resilience," in John Wiley & Sons, 2nd Edition, pp. 1-56, Dec. 2014.
[9] Madhuri, H. R. Tewari, P. K. Bhowmick, "Livelihood Vulnerability Index Analysis: an Approach to Study Vulnerability in the Context of Bihar," in Journal of Disaster Risk Studies, vol. 6, no. 1, pp. 1-13, Dec. 2014.
[10] D. Matyas, M. Pelling, "Positioning Resilience for 2015: the Role of Resistance, Incremental adjustment and Transformation in Disaster Risk Management Policy," in Journal of Disasters, vol. 39, Issue. 1, pp. 1-18, Jan. 2015.
[11] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, G. B. Sheblé "Power generation, operation, and control," 3rd. Ed, Willey press, Dec. 2013.
[12] R. Eskandarpour, G. Edwards and A. Khodaei, "Resilience-constrained unit commitment considering the impact of microgrids," 2016 North American Power Symposium (NAPS), Denver, CO, pp. 1-5, 2016.
[13] R. Eskandarpour, A. Khodaei and J. Lin, "Event-driven Security-Constrained Unit Commitment," 2016 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), Minneapolis, MN, pp. 1-5, 2016.
[14] D. K. Yoon, "Assessment of Social Vulnerability to Natural Disasters: a Comparative Study," in Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards," vol. 63, Issue. 2, pp. 823-843, 2012.
[15] S. L. Cutter, K. D. Ash, C. T. Emrich, "The Geographies of Community Disaster Resilience," in Journal of Global Environment Change," vol. 29, pp. 65-77, Nov. 2014.
[16] S. Ghosh and S. Kamalasadan, "An Integrated Dynamic Modeling and Adaptive Controller Approach for Flywheel Augmented DFIG Based Wind System," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 32, no. 3, pp. 2161-2171, May 2017.
[17] K. V. Vidyanandan and N. Senroy, "Frequency regulation in a wind–diesel powered microgrid using flywheels and fuel cells," in IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 10, no. 3, pp. 780-788, 2 18 2016.
[18] P. G. Rutberg, R. B. Goncharenko, E. G. Kasharsky, A. A. Safronov and N. G. Khanlarova, "About prospects of application of the flywheel stabilizer of frequency in a power system," PPPS-2001 Pulsed Power Plasma Science 2001. 28th IEEE International Conference on Plasma Science and 13th IEEE International Pulsed Power Conference. Digest of Papers (Cat. No.01CH37251), Las Vegas, NV, USA, pp. 998-999 vol.2, 2001.
[19] A. Khodaei and M. Shahidehpour, "Transmission Switching in Security-Constrained Unit Commitment," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 25, no. 4, pp. 1937-1945, Nov. 2010.
[20] Y. Wang, Z. Li, M. Shahidehpour, L. Wu, C. X. Guo and B. Zhu, "Stochastic Co-Optimization of Midterm and Short-Term Maintenance Outage Scheduling Considering Covariates in Power Systems," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 31, no. 6, pp. 4795-4805, Nov. 2016.
[21] S. Seyyed Mahdavi and M. H. javidi, "VPP Decision Making in Power Markets Using Benders Decomposition," in International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 24, no. 7, pp. 960-975, April. 2013.
[۲۲] حسین نظام‌آبادی، مهرداد ستایش‌نظر، «بهره‌برداری بهینه شبکه توزیع فعال در بازار انرژی، رزرو چرخان و توان اکتیو با استفاده از مفهوم نیروگاه مجازی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۴، ص۳۳۱-۳۴۳، زمستان ۱۳۹۵.
[23] M. M. Sahebi, E. A. Duki, M. Kia, A. Soroudi and M. Ehsan, "Simultaneous Emergency Demand Response Programming and Unit Commitment Programming in Comparison with Interruptible Load Contracts," in IET Generation Transmission & Distribution, vol. 6, no. 7, pp. 605-611, March 2016.
[24] V. K. Tumuluru, Z. Huang and D. H. K. Tsang, "Integrating Price Responsive Demand Into the Unit Commitment Problem," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 6, pp. 2757-2765, Nov. 2014.
[۲۵] مهدی روح‌الامینی، مسعود رشیدی، سعید اسماعیلی جعفرآبادی، «برنامه‌ریزی هم‌زمان انرژی و ذخیره کنترل فرکانس اولیه در سیستم قدرت با ملاحظه اثر خودتنظیمی بار»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۱، ص۱۹۷-۲۰۷، بهار ۱۳۹۵.
[26] L. Sigrist, "A UFLS Scheme for Small Isolated Power Systems Using Rate-of-Change of Frequency," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 30, no. 4, pp. 2192-2193, July 2015.
[27] R. Akbari, K. ziarati, "A Multilevel Evolutionary Algorithm for Optimizing Numerical Functions," in International Journal of Industrial Engineering Computations, vol. 2, pp. 419-430, 2011.

***