

تخمین پارامترهای مدل کلاسیک ژنراتور با استفاده از داده‌های PMU

امین ترکاشوند^۱ فرخ امینی فر^۲ حسن قاسمی^۲

۱- کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران

a.torkashvand@ut.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران

h.ghasemi@ut.ac.ir

۳- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران

faminifar@ut.ac.ir

چکیده: بروز رسانی و تخمین پارامترهای مدل ژنراتورهای موجود در سیستم، همواره برای بهره‌برداری مطمئن از شبکه حائز اهمیت بوده و تا کنون، مقالات بسیاری به تخمین و بروزرسانی پارامترهای ژنراتور سنکرون پرداخته‌اند. از سوی دیگر، ورود تجهیزات اندازه‌گیری فازوری (PMU) در سیستم‌های قدرت و افزایش کاربردهای روش روش آن، تحولی در پایش شبکه ایجاد نموده است. از این‌رو، استفاده از این تجهیزات برای بروز رسانی و تخمین پارامترهای سیستم قدرت، توجه بسیاری از محققان را به خود معطوف نموده است. بنابراین، این مقاله بر روی تخمین پارامترهای مدل کلاسیک (درجه‌ی دو) ژنراتور سنکرون، با استفاده از داده‌های واحدهای اندازه‌گیری فازوری، تمرکز دارد. در این مقاله، یک روش برای تخمین راکتانس مدل کلاسیک ژنراتور ارائه شده و پارامترهای الکترومکانیکی ژنراتور مانند ثابت اینرسی با استفاده از روش‌های حداقل مربعات بازگشتی و فیلتر کالمن تخمین زده می‌شود. سیستم تک ژنراتور متصل به شین بینهایت، در محیط نرم افزار PSAT شبیه‌سازی شده و پارامترهای ژنراتور متصل به شین بینهایت، با استفاده از روش‌های ارائه شده و داده‌های ایده‌آل و آلوده به نویز، تخمین زده می‌شود. همچنین، دو روش فیلتر کالمن و حداقل مربعات بازگشتی، با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

کلمات کلیدی: اعتبار سنجی مدل، تخمین پارامتر، واحدهای اندازه‌گیری فازوری (PMU)، مدل کلاسیک ژنراتور، حداقل مربعات بازگشتی، فیلتر کالمن.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۹/۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۲/۵

نام نویسنده‌ی مسئول: فرخ امینی فر

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - خیابان کارگر شمالی- دانشکده‌ی فنی دانشگاه تهران - دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر



۱- مقدمه

مهمترین نیازمندی اندازه‌گیری فازور ولتاژ، تعیین مرجع فازور ولتاژ سینوسی اندازه‌گیری شده در تمام نقاط بوده که با همانگ سازی زمان^۱ مرتفع می‌شود. با این حال، اندازه‌گیری همزمان با استفاده از زمان‌سنج‌های مستقل در نقاط اندازه‌گیری غیر ممکن است، زیرا حداقل دقت مورد نیاز برای اندازه‌گیری دقیق فازور ۰/۱ میلی ثانیه می‌باشد. از سوی دیگر، از زمانی که استفاده عمومی از سیستم موقعیت یاب جهانی^۲ (GPS) رایج شده است، تعیین زمان دقیق در هر نقطه از جهان به آسانی امکان پذیر است؛ بنابراین اندازه‌گیری فازورهای همزمان، یک تکیک عملی شده است [۱].

در همین راستا واحدهای اندازه‌گیری فازوری^۳ (PMU) از اواسط سال ۱۹۹۰ میلادی در شبکه‌ی قدرت آمریکا و اروپا بکار گرفته شد. PMU‌ها تجهیزاتی در سیستم قدرت است که اندازه‌گیری‌های سنکرون و بلادرنگ از فازورهای ولتاژ و جریان را فراهم می‌کند. با فراهم شدن امکان اندازه‌گیری همزمان فازورها در سیستم قدرت، کاربردهای این تکنولوژی رو به رشد است. از جمله‌ی این کاربردها می‌توان به حفاظت و پایش گسترده‌ی سیستم، تعیین حالت و تخمین پارامتر برای مدل‌های سیستم قدرت اشاره نمود [۲].

از سوی دیگر مدلسازی ژنراتور نقش مهمی در برنامه‌ریزی، بهره‌برداری و تجزیه و تحلیل سیستم‌های قدرت دارد. مدل‌های متعددی از ژنراتور سنکرون موجود است که ساده‌ترین آنها مدل درجه دوم یا همان مدل کلاسیک ژنراتور می‌باشد. کیفیت مدل، معمولاً براساس تناسب بین پاسخ مدل و پاسخ ژنراتور مربوطه سنجیده می‌شود. تخمین پارامترهای مدل‌های پیچیده‌تر ژنراتور سنکرون همچون مدل درجه ۶، علاوه بر هزینه‌بر بودن، نیازمند اعمال سیگنال تست به قسمت تحریک و انجام عملیات میدانی در نیروگاه می‌باشد. از سوی دیگر تخمین پارامترهای مدل کلاسیک ژنراتور با استفاده از داده‌های واحدهای اندازه‌گیری فازوری، علاوه بر سادگی، فاقد هزینه‌های تست می‌باشد. بنابراین بروزرسانی و تخمین پارامترهای مدل سیستم از جمله پارامترهای مدل کلاسیک ژنراتور سنکرون، با استفاده از واحدهای اندازه‌گیری فازوری مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است.

مرجع [۳] روشی برای تخمین پارامترهای ثابت اینرسی و راکتانس حالت گذرای مدل کلاسیک ژنراتور، در سیستم دو ماشینه - ارائه می‌کند. نواوری این مرجع، در استفاده از تغییرات ولتاژ ناشی از نوسانات بین ناحیه‌ای، به منظور برونویابی کردن امپدانس و اینرسی ژنراتورهای سیستم دو ماشینه است. مراجع [۴-۶] نیز در همین چهارچوب، راکتانس حالت گذرا و ثابت اینرسی مدل کلاسیک ژنراتور در سیستم دو ناحیه‌ای مجهر به جبران ساز توان راکتیو و سیستم سه ماشینه را تخمین می‌زنند.

مراجع [۹-۷] با استفاده از فیلتر توسعه یافته‌ی کالمن^۴ و تکنیک بازتکرار رویداد^۵ به تخمین پارامترهای اینرسی، ضریب میرایی و راکتانس مدل کلاسیک ژنراتور بر اساس داده‌های PMU‌ها می‌پردازند. اختلاف میان مراجع [۸ و ۹] با مرجع [۱۰] به نوع استفاده از تکنیک بازتکرار رویداد و تعداد پارامترها و حالت‌های تخمین زده شده‌ی سیستم، باز می‌گردد. مرجع [۱۰] روی تخمین پارامترهایی همچون ثابت اینرسی، ضریب میرایی و راکتانس با استفاده از فیلتر کالمن بی‌نشان تمرکز دارد.

مرجع [۱۱] با استفاده از قوانین حاکم بر مدل کلاسیک ژنراتور و واریانس مشاهدات، راکتانس حالت گذرا را تخمین زده، سپس با استفاده از روش حداقل مربعات، ثابت اینرسی مدل کلاسیک ژنراتور را تخمین می‌زند. مرجع [۱۲] راکتانس حالت گذرای مدل کلاسیک ژنراتور را به روش حداقل مربعات غیر خطی تخمین زده و از روش حداقل مربعات ساده برای تخمین ثابت اینرسی و ضریب میرایی استفاده می‌کند.

تخمین پارامترهای مدل کلاسیک ژنراتور به دو دسته‌ی کلی تقسیم می‌شود: پارامترهای الکتریکی و پارامترهای الکترومکانیکی. روش‌های ارائه شده برای تخمین این پارامترها به دو دسته‌ی کلی دسته بندی می‌شود: دسته‌ی اول با استفاده از ابزارهایی همچون فیلتر کالمن، حداقل مربعات... به تخمین پارامترها می‌پردازند که این روش‌ها را روش‌های غیرمستقیم می‌نامیم. مراجع [۱۲-۷] نمونه‌هایی از این دسته می‌باشند. دسته‌ی دوم که روش‌های مستقیم نام دارند با استفاده از معادلات حاکم بر سیستم قدرت به تخمین پارامترهای آن می‌پردازند [۳-۶]. روش‌های مستقیم ارائه شده در مراجع [۶-۳] بدليل تکنیک روند تخمین پارامترهای الکتریکی و الکترومکانیکی قابلیت اطمینان بالاتری نسبت به روش‌های غیرمستقیم، که پارامترهای الکتریکی و الکترومکانیکی را به صورت همزمان تخمین می‌زنند، داشته و در حالت کلی دقت روش‌های مستقیم نسبت به روش‌های غیرمستقیم مطلوب‌تر است. لازم به ذکر است که روش‌های مستقیم ارائه شده تا کنون دارای ضعف وابستگی به توپولوژی شبکه بوده و برای هر شبکه دلخواهی قابل پیاده سازی نمی‌باشند. بطور مثال مرجع [۳] به تخمین پارامترهای مدل کلاسیک ژنراتور در سیستم دو ناحیه‌ای می‌پردازد، در حالی که همین نویسنده در مرجع [۵] روشی برای تخمین مدل کلاسیک ژنراتور در سیستم سه ماشینه ارائه می‌نماید. بنابراین مطلوب بودن روش‌های مستقیم در مقایسه با روش‌های غیرمستقیم از یکسو وابستگی روش‌های مستقیم به توپولوژی شبکه از سوی دیگر، نیاز به روشی که دارای دقت و قابلیت اطمینان مطلوبی باشد و به توپولوژی شبکه وابسته نباشد را برجسته می‌نماید.

هدف از این مقاله، ارائه‌ی روشی برای تخمین راکتانس حالت گذرا و پارامترهای الکترومکانیکی مدل کلاسیک ژنراتور مانند ثابت اینرسی و ضریب میرایی، با استفاده از داده‌های PMU می‌باشد. مدل کلاسیک ژنراتور سنکرون کاربردهای متفاوتی دارد و برای مطالعات



کوچک می‌باشد، که داده‌های آن توسط PMU‌ها ثبت شده است. با توجه به شکل (۱) که مدل کلاسیک ژنراتور متصل به شبکه را نمایش می‌دهد، ولتاژ ترمینال، راکتانس حالت گذرا و ولتاژ درونی مدل کلاسیک ژنراتور با روابط (۱) تا (۴) به هم مربوط می‌شوند:

$$\tilde{E} = V + jx'_d \tilde{I} \quad (1)$$

$$\tilde{E} = V + jx'_d \left(\frac{P - jQ}{V} \right) \quad (2)$$

$$\tilde{E} = \left(V + x'_d \frac{Q}{V} \right) + jx'_d \left(\frac{P}{V} \right) \quad (3)$$

در روابط فوق، P و Q به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو اندازه‌گیری شده، V ولتاژ اندازه‌گیری شده در ترمینال ژنراتور و x'_d راکتانس حالت گذرا ژنراتور می‌باشند. اندازه‌های مربع ولتاژ درونی ژنراتور از رابطه‌ی (۴) قابل محاسبه می‌باشد:

$$E^2 = \left(V + x'_d \frac{Q}{V} \right)^2 + x'^2_d \left(\frac{P}{V} \right)^2 \quad (4)$$

معادله‌ی (۴) را به شکل معادله‌ی (۵) بازنویسی می‌نماییم:

$$E^2 = V^2 + x'^2_d \left(\frac{P^2 + Q^2}{V^2} \right) + 2x'_d Q \quad (5)$$

از آنجا که در ژنراتور، اندازه‌ی ولتاژ درونی مقداری ثابت است، با مشتق گرفتن از رابطه‌ی (۵) می‌توان این پارامتر را حذف نمود. بنابراین داریم:

$$0 = \frac{d(V^2)}{dt} + x'^2_d \frac{dS_1}{dt} + 2x'_d \frac{dQ}{dt} \quad (6)$$

در رابطه‌ی فوق:

$$S_1 = \frac{P^2 + Q^2}{V^2}$$

رابطه‌ی (۶) را می‌توان به فرم زیر بازنویسی نمود:

$$-\frac{d(V^2)/dt}{dS_1/dt} = x'^2_d + 2x'_d \frac{dQ/dt}{dS_1/dt} \quad (7)$$

حال تنها پارامتر مجهول معادله‌ی (۷) راکتانس حالت گذرا می‌باشد، با مربع سازی می‌توان رابطه‌ی اخیر را به فرم معادله‌ی (۸) و در نهایت (۹) بازنویسی کرد:

$$-\frac{d(V^2)/dt}{dS_1/dt} + \left(\frac{dQ/dt}{dS_1/dt} \right)^2 = x'^2_d + 2x'_d \frac{dQ/dt}{dS_1/dt} + \left(\frac{dQ/dt}{dS_1/dt} \right)^2 \quad (8)$$

گوناگونی استفاده می‌شود. بطور مثال، تحلیل پایداری سیگنال کوچک برای سیستم چند ماشینه با استفاده از مدل کلاسیک ژنراتور، انجام می‌شود [۱۲]. این مقاله دارای دو نوآوری می‌باشد، در قسمت اول یک روش مستقیم برای تخمین پارامترهای الکتریکی مدل کلاسیک ژنراتور را به نماید، که قابلیت اطمینان نتایج آن از روش‌های غیرمستقیم بهتر بوده و با روش‌هایی همچون [۶-۳] برابری می‌کند و از طرفی به تپولوژی شبکه وابسته نمی‌باشد. در قسمت دوم، پارامترهای الکتروموکانیکی مدل کلاسیک ژنراتور با استفاده از معادله‌ی اصلاح شده‌ی نوسان بصورت بلادرنگ تخمین زده می‌شود. بدینهی است در مورد یک ژنراتور، بلادرنگ بودن روش امتیازی محسب نمی‌شود لیکن در مورد مدلسازی نواحی مختلف شبکه قدرت برای اهداف بهره‌برداری، این بلادرنگ بودن ویژگی کلیدی خواهد بود. شایان ذکر است که تفکیک روند تخمین پارامترهای الکتریکی و الکتروموکانیکی موجب شده است که تعداد پارامترهای مجهول مورد استفاده در فیلتر کالمن در مقایسه با مراجع [۶-۷] کاهش یابد. استفاده از معادله اصلاح شده‌ی نوسان از یکسو و کاهش تعداد پارامترهای مجهول از سوی دیگر موجب بهبود قابلیت اطمینان نتایج و دقت تخمین پارامترهای الکتروموکانیکی شده است.

پیش از این، پارامترهای الکتروموکانیکی به روش‌های حداقل مربعات^۱ و فیلتر کالمن توسعه یافته تخمین زده شده‌اند، اما روش حداقل مربعات به تنها یکی برای کاربردهای بلادرنگ مناسب نبوده و روش فیلتر کالمن توسعه یافته نسبت به فیلتر کالمن پیچیده‌تر است. از این‌رو در این مقاله پارامترهای الکتروموکانیکی به روش‌های حداقل مربعات بازگشتی^۲ و فیلتر کالمن تخمین زده می‌شوند. همچنین از آنجا که فیلتر کالمن ساده جوابگوی تخمین پارامترهای الکتروموکانیکی می‌باشد، مشتقهای بهبود یافته ولی پیچیده تر فیلتر کالمن در این مقاله مورد استفاده قرار نمی‌گردد. خطای در نظر گرفته شده برای تخمین پارامترهای ژنراتور، شامل خطاهای سیگنال کوچکی که موجب نوسانات فرکانس و توان می‌شود، می‌باشند. بدلیل نرخ نمونه‌برداری و دقت اندازه‌گیری بالاتر و همچنین قابلیت تخمین دقیق فرکانس، از داده‌های PMU جهت تخمین پارامترهای مدنظر استفاده می‌شود.

ساختمار مقاله به ترتیب ذیل می‌باشد: در بخش ۲ یک روش مستقیم برای تخمین راکتانس مدل کلاسیک ژنراتور ارائه می‌شود و بخش ۳ به تخمین پارامترهای الکتروموکانیکی مدل کلاسیک ژنراتور با استفاده از معادله اصلاح شده‌ی نوسان می‌پردازد. در بخش ۴ با تخمین پارامترهای ژنراتور سیستم تک ماشین به شین بینهایت روش‌های ارائه شده اعتبارسنجی می‌شوند و در نهایت در بخش ۵، نتیجه‌گیری مطالعات گزارش می‌شود.

۲- تخمین راکتانس حالت گذرا

هدف از این قسمت ارائه‌ی یک روش برای تخمین راکتانس حالت گذرا مدل کلاسیک ژنراتور با استفاده از داده‌های خطاهای سیگنال

۳- تخمین پارامترهای الکتروموکانیکی

در این قسمت دو روش به منظور تخمین پارامترهای الکتروموکانیکی مدل کلاسیک ژنراتور سنکرون ارائه شده است. پارامترهای مورد نظر شامل ثابت اینرسی و ضریب میرایی است. همچنین، توان مکانیکی اعمالی به شفت نیز (اگرچه جزو پارامترهای ماشین نمی باشد) کمیتی است که مقدار آن توسط این روش‌ها قابل تخمین می باشد و لذا در ادامه با مسامحه، از آن نیز به عنوان پارامترهای الکتروموکانیکی یاد می شود. به منظور تخمین این پارامترها، از داده‌های ترمینال ژنراتور شامل توان و فرکانس که توسط PMU‌ها جمع آوری شده است، استفاده می شود. داده‌های جمع آوری شده به بعد از قوع خطاهای سیگنال کوچک که منجر به نوسانات فرکانس و توان می شود، مربوط می باشند. سپس با استفاده از این داده‌ها، معادله‌ی نوسان اصلاح شده و روش‌های حداقل مربعات بازگشتی و فیلتر کالمون، پارامترهای الکتروموکانیکی تخمین زده می شود.

برای افزایش دقت تخمین، از معادله‌ی نوسان اصلاح شده استفاده می شود. یعنی،

$$2Hf \frac{df}{dt} + D\Delta f = P_m - P_e \quad (11)$$

در معادله‌ی فوق، f ، فرکانس، H ثابت اینرسی، D ضریب میرایی، P_m توان مکانیکی ورودی و P_e توان الکتریکی خروجی می باشد. شایان ذکر است که این معادله عبارت دقیق معادله نوسان می باشد و تفاوت آن با معادله نوسان تقریبی که پیشتر در مراجع [۱۱-۱۶] مورد استفاده قرار گرفته، ضریب فرکانس در ثابت اینرسی می باشد که در رابطه‌ی (۱۱) با رنگ قرمز نمایش داده شده است. بدیهی است که در استفاده از معادله نوسان اصلاح شده، موجب بهبود دقت تخمین پارامترهای الکتروموکانیکی می شود.

در همین راستا از روش‌های بازگشتی استفاده می شود، روش‌های بازگشتی به مقدار اولیه‌ای برای پارامترهای مورد نظر برای تخمین و کوواریانس خطای این پارامترها نیاز دارند. برای تعیین مقدار اولیه برای روش‌های بازگشتی، داده‌های جمع آوری شده از PMU‌ها به دو قسمت تقسیم می شود؛ از دسته‌ی اول داده‌ها با کمک روش حداقل مربعات، برای محاسبه مقدارهای اولیه پارامترها و ماتریس کوواریانس خطای استفاده می شود و از دسته‌ی دوم داده‌ها با هدف تخمین دقیق تر پارامترهای الکتروموکانیکی و پایش بلادرنگ این پارامترها استفاده می شود. دسته‌ی دوم داده‌های جمع آوری شده، ورودی روش‌های بازگشتی محاسبه می شوند.

چنانچه t_0 زمان شروع ثبت داده‌ها و ابتدای دسته‌ی اول داده‌ها و t انتهای این دسته باشد، مقدار اولیه پارامترهای مورد نظر از رابطه‌ی (۱۲) و ماتریس کوواریانس از رابطه‌ی (۱۳) قابل محاسبه بوده و رابطه‌ی (۱۴) مجموع مشاهدات یا دسته‌ی اول داده‌های اندازه‌گیری شده را نمایش می دهد [۱۲].

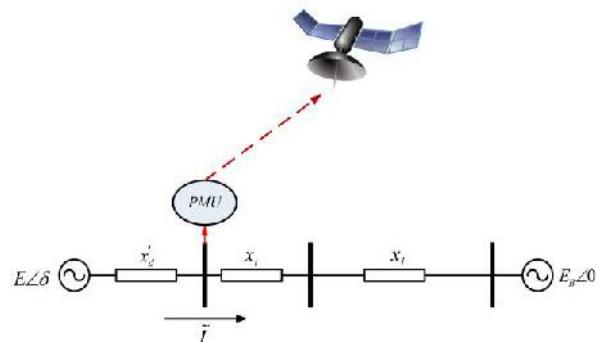
$$\left(x'_d + \frac{dQ/dt}{dS_1/dt} \right)^2 = \left(\frac{dQ/dt}{dS_1/dt} \right)^2 - \frac{d(V^2)/dt}{dS_1/dt} \quad (9)$$

بنابراین، مقدار راکتانس حالت گذرا مدل کلاسیک ژنراتور سنکرون برای هر تعداد محدود بیشتر از یکی از داده‌های توان اکتیو و راکتیو و همچنین ولتاژ اندازه‌گیری شده توسط PMU از رابطه‌ی (۱۰) بدست می آید:

$$x'_d = \sqrt{U_1} - T_1 \quad (10)$$

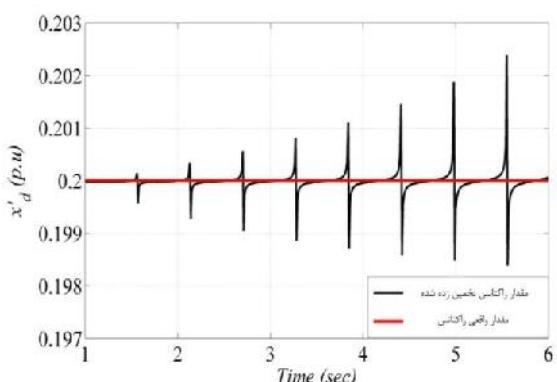
که در رابطه‌ی فوق:

$$T_1 = \frac{dQ/dt}{dS_1/dt}, \quad U_1 = \left(\frac{dQ/dt}{dS_1/dt} \right)^2 - \frac{d(V^2)/dt}{dS_1/dt}$$



شکل (۱): شماتیک الکتریکی اتصال مدل کلاسیک ژنراتور به شین بینهایت با درنظر گرفتن باس‌های مجهز به PMU.

با تخمین راکتانس حالت گذرا، اندازه‌ی ولتاژ درونی ژنراتور و زاویه‌ی آن را می توان از رابطه‌ی (۱) محاسبه نمود. شکل (۲) مقادیر تخمین زده شده را برای بازه‌ی زمانی ۵ ثانیه بعد از خطا که دامنه‌ی دهد. دیده شود که در زمان‌های ابتدائی پس از خطا که دامنه‌ی تغییرات زیاد است، مقادیر تخمین زده شده دارای دقت بالاتری می باشند. ضریبهای دیده در شکل (۲)، با فرکانس نوسانات توان و ولتاژ تکرار می شود. با میانگین گرفتن از مقادیر تخمین زده شده بین ضریبهای، می توان دقت و مقاوم بودن روش را در برای نویز افزایش داد.



شکل (۲): مقادیر راکتانس تخمین زده شده و مقدار حقیقی آن، با استفاده از روش پیشنهادی و مشتقگیری دیفرانسیلی.



در رابطه‌ی (۲۱)، H بیانگر ثابت اینرسی، D ضریب میرایی و P_m توان مکانیکی اعمالی به شفت ژنراتور می‌باشد. چنانچه ژنراتور تحت مطالعه به گاوارنر مجهز باشد، مقدار توان مکانیکی اعمالی به شفت ژنراتور در حین خطا تغییر می‌کند ولی ثابت اینرسی ژنراتور و ضریب میرایی آن، با گذشت زمان ثابت باقی می‌ماند. بنابراین استفاده از روش حداقل مربعات بازگشتی به منظور پایش تغییرات توان مکانیکی اعمالی به شفت ژنراتور و با حجم محاسبات کم بسیار مناسب می‌باشد.

$$\varepsilon(t+1) = y(t+1) - x^T(t+1)\hat{\theta}(t) \quad (18)$$

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + P(t+1)x(t+1)\varepsilon(t+1) \quad (19)$$

در روابط فوق، علامت T بیانگر ترانه‌های ماتریس مورد نظر، $\varepsilon(t)$ میزان اختلاف خروجی تخمین زده شده با مقدار انسازه‌گیری شده خروجی و $P(t)$ میزان کوواریانس خطأ در زمان t می‌باشد.

۳-۱-۳- تخمین پارامترهای الکتروموکانیکی ژنراتور با استفاده از حداقل مربعات بازگشتی

چنانچه بخواهیم به روش حداقل مربعات بازگشتی، پارامترهایی از قبیل توان مکانیکی اعمالی به شفت ژنراتور، ثابت اینرسی ژنراتور و ضریب میرایی ژنراتور تخمین بزنیم، با توجه به معادله‌ی نوسان اصلاح شده، ورودی و خروجی این روش به شرح مجموعه روابط (۲۰) می‌باشد:

$$X(t) = \begin{bmatrix} -2f(1) \frac{df(1)}{dt} & 1-f(1) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -2f(t) \frac{df(t)}{dt} & 1-f(t) & 1 \end{bmatrix}$$

$$x(t+1) = \begin{bmatrix} -2f(t+1) \frac{df(t+1)}{dt} & 1-f(t+1) & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y(t) = \begin{bmatrix} P_e(1) \\ \vdots \\ P_e(t) \end{bmatrix}, \quad y(t+1) = P_e(t+1) \quad (20)$$

همچنین پارامترهای مورد نظر به فرم معادله‌ی (۲۱) نشان داده می‌شود:

$$\hat{\theta}(t) = \begin{bmatrix} H(t) \\ D(t) \\ P_m(t) \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\hat{\theta}(t) = \left(X^T(t) X(t) \right)^{-1} X^T(t) Y(t) \quad (12)$$

$$P(t) = X^T(t) X(t) \quad (13)$$

$$X(t) = \{x(\tau), y(\tau)\}_{\tau=t_0}^t \quad (14)$$

در روابط فوق، $X(t)$ مجموع مشاهدات یا دسته‌ی اول داده‌های اندازه‌گیری شده، $x(\tau)$ و $y(\tau)$ ورودی و خروجی مدل مورد نظر از زمان t_0 تا زمان t می‌باشند. چنانچه θ پارامترهای سیستم، که ورودی را به خروجی مربوط سازند، باشد، (t) مقدار تخمین زده شده بازای اطلاعات دریافت شده تا زمان t می‌باشد.

۳-۱-۴- تخمین پارامترهای سیستم با استفاده از روش حداقل مربعات بازگشتی:

روش‌های بازگشتی تخمین، معمولاً برای کاربردهای بلادرنگ مفید است. همچنین، برای سیستم‌های پویا که به پایش تغییرات سیستم نیاز است، الگوریتم‌های بازگشتی در تخمین پارامترها و حالات سیستم کاربرد فراوانی دارد. برخی از این الگوریتم‌ها دارای مزایایی همچون کاهش بار محاسباتی می‌باشند. از این‌رو، در سیستم‌های پیچیده و بزرگ همچون سیستم قدرت که بار محاسباتی سنگین است، الگوریتم‌های بازگشتی تخمین کاربردهای فراوانی دارند [۱۴ و ۱۵].

۳-۱-۱-۱- حداقل مربعات بازگشتی [۱۳]

در روش حداقل مربعات همه‌ی داده‌ها را باید به صورت یک مجموعه در اختیار داشته باشیم و در صورتی که یک مشاهده به مجموعه مشاهدات اضافه شود، دوباره باید تخمین را تکرار کنیم. در نتیجه سرعت تخمین کم و حجم محاسبات افزایش پیدا می‌کند. روش حداقل مربعات بازگشتی، با ورود مشاهده‌ی جدید می‌تواند تخمین را اصلاح کند، و دوباره آن را تکرار نمی‌کند.

مجموعه مشاهدات را به صورت معادله‌ی (۱۵) در نظر می‌گیریم:

$$X(t+1) = \{x(t+1), y(t+1)\} \cup X(t) \quad (15)$$

چنانچه (۱) مقدار تخمین زده شده در زمان $t+1$ باشد، با استفاده از مجموعه روابط (۱۶) تا (۱۹) می‌توان از تخمین $\theta(t)$ به $\theta(t+1)$ رسید.

$$X(t+1) = \begin{pmatrix} X(t) \\ x^T(t+1) \end{pmatrix}, \quad Y(t+1) = \begin{pmatrix} Y(t) \\ y(t+1) \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$P(t+1) = P(t) - \frac{P(t)x(t+1)x^T(t+1)P(t)}{1+x^T(t+1)P(t)x(t+1)} \quad (17)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + G_k \left(z_k - H_z \hat{x}_k^- \right) \quad (24)$$

$$P_k = (I - G_k H_z) P_k^-$$

در روابط (۲۳) و (۲۴)، \hat{x}_k^- حالت پیش‌بینی شده در گام k ام و \hat{x}_k مقدار تصحیح شده در این گام را نمایش داده، G_k بهره‌ی فیلتر کالمن و P_k^- مقدار پیش‌بینی شده و تصحیح شده‌ی ماتریس کوواریانس در گام k ام می‌باشد.

تخمین پارامتر با استفاده از این روش را می‌توان در ۸ مرحله‌ی خلاصه نمود:

۱. تقسیم کردن داده‌های اندازه‌گیری شده به دو قسمت.
۲. محاسبه‌ی مقدار پیش‌بینی شده برای پارامترها و ماتریس کوواریانس با استفاده از روش حداقل مربعات.
۳. نوشتن اطلاعات و معادلات سیستم به فرم تعریف شده برای فیلتر کالمن و وارد نمودن مقدار پیش‌بینی شده برای گام قبلی.
۴. محاسبه‌ی مقدار پیش‌بینی شده برای پارامترها و کوواریانس خطای آنها.
۵. محاسبه‌ی بهره‌ی فیلتر کالمن با اطلاعات بدست آمده از مرحله‌ی پیش‌بینی.
۶. محاسبه‌ی اختلاف مقدار پیش‌بینی شده با مقدار بدست آمده از مدل تخمین زده برای سیستم.
۷. اصلاح مقدار پیش‌بینی شده و کوواریانس خطای آنها با استفاده از اطلاعات بدست آمده از مرحله قبل.
۸. تکرار مرحله ۲ تا ۷ تا همگرایی به جواب.

همگرایی فیلتر کالمن دارای دو نشانه است: یکی میل کردن بهره‌ی فیلتر کالمن به صفر است و دیگری این است که اختلاف مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار تخمین زده شده بوسیله‌ی مدل سیستم، به صفر میل کند.

۲-۲-۳- تخمین پارامترهای الکترومکانیکی ژنراتور با استفاده از فیلتر کالمن

در این قسمت به جزئیات ریاضی مدل فیلتر کالمن، با هدف تخمین پارامترهای دینامیکی مدل دینامیکی ژنراتور پرداخته می‌شود. پارامترهایی که باید تخمین زده شوند شامل توان مکانیکی P_m ، ثابت اینرسی H و ضریب میرایی D می‌باشند. اطلاعاتی که PMU ها به ما می‌دهند، شامل توان اکتیو و فرکانس می‌باشد. فرکانس به عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شده و توان اکتیو نقش خروجی مدل را

۲-۲-۳- تخمین پارامترهای سیستم با استفاده از روش

فیلتر کالمن

فیلتر کالمن یک تخمین گر دینامیکی است که با استفاده از داده‌های نویزی تجهیزات اندازه‌گیری، پس از گذشت زمان محدود می‌تواند به مقادیر واقعی متغیرهای حالت سیستم همگرا شود.

۲-۲-۳- فیلتر کالمن [۱۶ و ۱۷]

حالات یا پارامترهایی را که می‌خواهیم تخمین بزنیم، بصورت گسسته‌ی زمانی در نظر گرفته و سیستم مورد نظر را به فرم معادلات (۲۲) مدل می‌کنیم:

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_{k-1}$$

$$z_k = H_z x_k + v_k \quad (22)$$

در معادلات فوق:

A : ماتریس حالت می‌باشد که حالت یک مرحله‌ی قبل سیستم را به حالت فعلی مرتبط می‌کند.

B : ماتریس ورودی‌های کنترلی برای حالت‌های سیستم است.

w_k : مقدار اندازه‌گیری شده از سیستم می‌باشد.

H_z : ماتریسی است که حالت‌ها را به اندازه‌گیری‌های واقعی مرتبط می‌کند.

v_k : نویز مدل، سیستم و یا نویز فرآیند می‌باشد.

v_k : نویز اندازه‌گیری است. از آنجا که هر تجهیز اندازه‌گیری دقیق نبوده و دارای نویز می‌باشد، این ترم در نظر گرفته شده است.

فرض می‌کنیم نویز سیستم و نویز اندازه‌گیری دارای توزیع احتمالاتی نرمال با میانگین صفر و کوواریانس Q و R باشند. همچنین

نماینده این نویزها را مستقل از هم فرض می‌کنیم. در عمل کوواریانس نویز فرایند Q و کوواریانس نویز اندازه‌گیری R ممکن است بازی هر گام زمانی و یا هر نمونه‌ی اندازه‌گیری تغییر کند، اما در اینجا مقدار

آنها را ثابت فرض می‌کنیم. فرایند فیلتر کالمن برای مدل‌های گسسته-ی سیستم، در هر گام زمانی دارای دو قسمت پیش‌بینی و تصحیح

بوده و برای پیش‌بینی هر مرحله از اطلاعات گام قبلی استفاده می‌شود. معادلات مرحله‌ی پیش‌بینی و مرحله‌ی تصحیح به ترتیب توسط روابط

(۲۳) و (۲۴) عنوان شده است:

معادلات پیش‌بینی کننده:

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1}$$

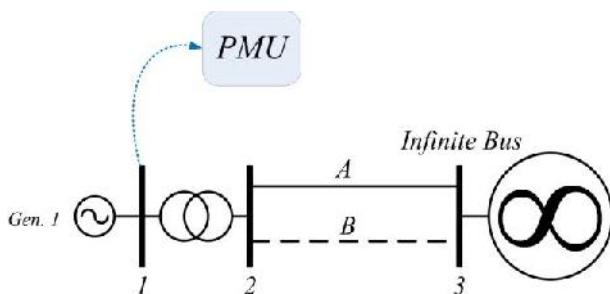
$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (23)$$

معادلات تصحیح کننده:

$$G_k = P_k^- H_z^T \left(H_z P_k^- H_z^T + R \right)^{-1}$$

۴- شبیه‌سازی

به منظور اعتبارسنجی روش‌های ارائه شده، سیستم تک ژنراتور را که با دو خط موازی به شین بینهایت متصل شده است را در نرمافزار PSAT^۸ شبیه‌سازی نموده و از داده‌های بسیار کمیم. منظور از شین بینهایت سیستم پارامترهای ژنراتور استفاده می‌کنیم. قدرت بزرگی است که تحت تأثیر ماشین مورد مطالعه قرار نمی‌گیرد. شایان ذکر است که داده‌های مورد نیاز برای فرایند تخمین، از شبیه‌سازی مدل کلاسیک ژنراتور در محیط نرم افزار SAT با فرکانس نمونه برداری مشخص، حاصل شده است. سیستم مورد نظر در شکل (۴) نمایش داده شده که در آن ژنراتور ۱ از طریق دو خط A و B به شین بینهایت متصل شده است. مدل در نظر گرفته شده برای ژنراتور ۱، مدل کلاسیک می‌باشد. خطای مورد نظر، قطع یک خط از دو خط موازی است که ژنراتور را به شین بینهایت متصل می‌کند. خط B که با خط چین در شکل (۴) نمایش داده شده است، در ثانیه‌ی اول شبیه‌سازی قطع می‌شود. شایان ذکر است که در اینجا همچون مرجع [۱۸]، PMU روی بسیار ژنراتور در نظر گرفته شده است.



شکل (۴): شماتیک سیستم تک ماشین متصل به شین بینهایت.

قطع خط B، نوسانات فرکانس و توان را به دنبال دارد. با استفاده از داده‌های این نوسانات، که بوسیله‌ی PMU مراقبه شده است، مقادیر راکتانس حالت گذرا، ثابت اینرسی، ضربی میرایی و توان مکانیکی اعمال شده به ژنراتور ۱ تخمین زده می‌شود. از آنجا که ژنراتور ۱ به گاورنر مجهز نمی‌باشد، فرض مقدار توان مکانیکی ثابت، فرض صحیحی در فرایند تخمین می‌باشد. شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) شکل موج ولتاژ و توان‌های اکتیو و راکتیو اندازه‌گیری شده در ترمینال ژنراتور، توسط PMU را بعد از وقوع خط نمایش می‌دهند. نوسان شکل موج‌های ولتاژ و توان‌های اکتیو و راکتیو از نوسانات سرعت روتور ژنراتور نشات می‌گیرد که معادل الکتریکی آن فرکانس است. همچنین، تغییرات فرکانس هم در طی زمان، معادل تغییرات زاویه ولتاژ می‌باشد که خود عامل تغییر توان است. بنابراین، همانگونه که مشهود است فرکانس نوسانات ولتاژ و توان‌های اکتیو و راکتیو یکسان است.

دارد. مدل گسسته‌ای که رفتار سیستم را توصیف می‌کند توسط مجموعه روابط (۲۵) بیان شده است:

$$H_{k+1} = H_K + w_1$$

$$D_{k+1} = D_k + w_2$$

$$P_{m,k+1} = P_{m,k} + w_3$$

در روابط فوق، w_i نویز می‌باشد. ماتریس ژاکوبین براساس معادلات فوق به قرار رابطه‌ی (۲۶) بدست می‌آید:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

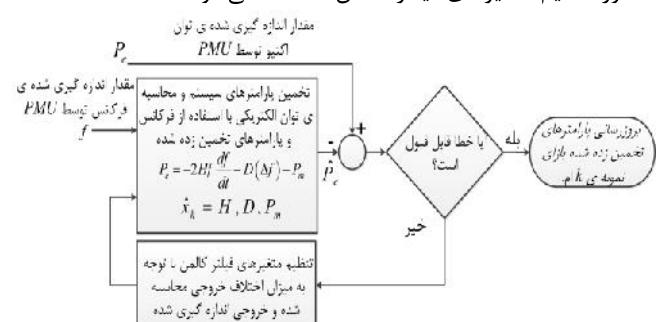
ماتریس حساسیت اندازه‌گیری H_z را می‌توان به فرم معادله‌ی (۲۷) نوشت:

$$H_z = \begin{bmatrix} -2f_k \frac{df_k}{dt} & -\Delta f_k & -1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

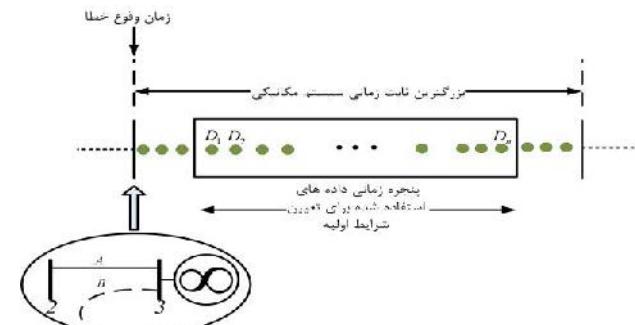
ماتریس پارامترهای سیستم و ماتریس خروجی سیستم نیز به فرم معادله‌ی (۲۸) می‌باشند:

$$\hat{x}_k = \begin{bmatrix} H_k \\ D_k \\ P_{m,k} \end{bmatrix}, \quad z_k = P_{e,k} \quad (28)$$

به منظور بهبود عملکرد روند تخمین با استفاده از فیلتر کالمون، از تکنیک بازتکرار رویداد در تنظیم بهره‌ی فیلتر کالمون استفاده شده است. شکل (۳) روند تخمین پارامترهای H ، D و P_m را با استفاده از الگوریتم فیلتر کالمون و تکنیک مجزاسازی مدل نمایش می‌دهد. همانگونه که در شکل (۳) مشهود است، فرکانس نقش ورودی مدل را داشته و از مقایسه‌ی توان اکتیو اندازه‌گیری شده با خروجی مدل، به منظور تنظیم متغیرهای فیلتر کالمون استفاده می‌شود.



شکل (۳): الگوریتم تخمین پارامترهای الکترومکانیکی، با استفاده از فیلتر کالمون و تکنیک بازتکرار رویداد.



شکل (۸): موقعیت زمانی داده‌های استفاده شده برای تعیین شرایط اولیه.

جدول (۱) مقدار تخمینی برای راکتانس حالت گذاری ژنراتور ۱ را نمایش می‌دهد. روش پیشنهادی دارای دقت بسیار خوبی است، جدول (۱) نیز دقت روش پیشنهادی برای تخمین راکتانس ژنراتور را تایید می‌نماید. جدول (۲) مقدار شبهیه‌سازی شده و مقادیر تخمین زده شده برای ثابت اینرسی، ضریب میرایی و توان مکانیکی ژنراتور ۱ را به دو روش حداقل مربعات بازگشتی و فیلتر کالمن با یکدیگر مقایسه کرده و جدول (۳) مقادیر خطای تخمین این سه پارامتر را بازای دو روش حداقل مربعات بازگشتی و فیلتر کالمن با هم مقایسه می‌کند.

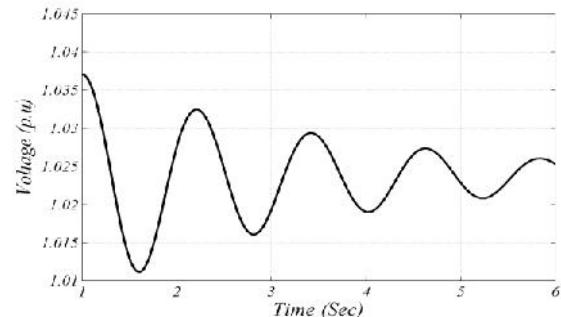
مقادیر راکتانس و پارامترهای الکترومکانیکی برای داده‌های آلوده به نویز سفید گوسی با سیگنال به نویز $80 \mu\text{V}$ تخمین زده شده است، که این نویز کلیه مراحل ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری، اتصالات، دستگاه PMU و الگوریتم‌های اندازه‌گیری را شامل می‌شود. جدول (۴) راکتانس تخمین زده شد با داده‌های نویزی را نمایش داده و جداول (۵) و (۶) مقادیر تخمین زده شده برای پارامترهای الکترومکانیکی و دقت تخمین را با داده‌های نویزی، برای دو روش حداقل مربعات بازگشتی و فیلتر کالمن با یکدیگر مقایسه می‌کند.

جدول (۱): مقدار تخمین زده شده و خطای تخمین برای راکتانس حالت گذاری ژنراتور، در مبنای 900 MVA و 20 kV .

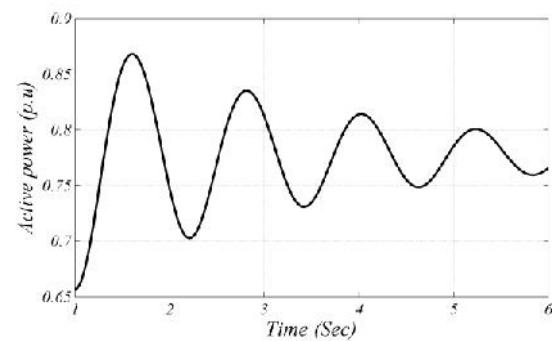
خطای مقدار تخمین	مقدار تخمین زده شده (در واحد)	مقدار واقعی (در واحد)	
0.003	0.2	0.2	راکتانس حالت گذرا

جدول (۲): مقادیر تخمین زده شده برای پارامترهای الکترومکانیکی مدل کلاسیک ژنراتور سنکرون در مبنای 900 MVA و 20 kV .

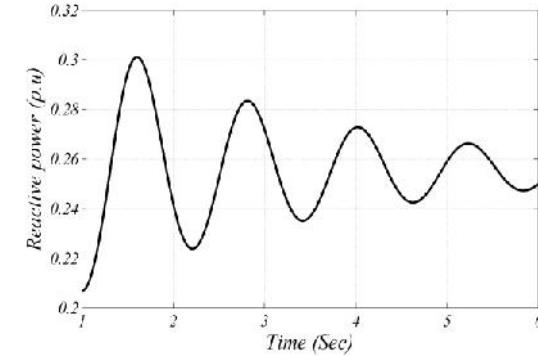
فیلتر کالمن	حداقل مربعات بازگشتی	روش	
		مقدار واقعی	پارامتر
3.008	3.009	3	ثابت اینرسی (H)
9.981	9.98	10	ضریب میرایی (D)
499.083	500.08	500	توان مکانیکی (P_m)



شکل (۵): شکل موج تغییرات ولتاژ ترمینال ژنراتور پس از خطا بر مبنای 20 kV .



شکل (۶): شکل موج تغییرات توان راکتیو ترمینال ژنراتور پس از خطا بر حسب واحد با مبنای 900 MVA .



شکل (۷): شکل موج تغییرات توان راکتیو ترمینال ژنراتور پس از خطا بر حسب واحد با مبنای 900 MVA .

به عنوان ملاحظات عملی در حالتی که ژنراتور تحت مطالعه به گاورنر مجهز باشد، فاصله‌ی زمانی پنجره‌ی داده‌های استفاده شده برای تعیین شرایط اولیه‌ی سیستم، باید کوچکتر از بزرگترین ثابت زمانی گاورنر با سیستم مکانیکی باشد. چرا که تنها در اینصورت، لحاظ کردن مقدار ثابتی برای توان مکانیکی در بازه‌ی مذکور، فرض صحیحی است. شکل (۸) نمای خوبی از تقابل داده‌های استفاده شده برای تخمین شرایط اولیه‌ی حداقل مربعات بازگشتی و فیلتر کالمن و بزرگترین ثابت زمانی سیستم مکانیکی را برای n داده‌ی پنجره‌ی زمانی اول به نمایش می‌گذارد. مقادیر D_1 تا D_n که در شکل (۸) نمایش داده شده‌اند، داده‌های انتخابی از اطلاعات گرفته شده از PMU ها می‌باشند.



مشکل نویز و داده‌های پرت، به داده‌های اندازه‌گیری شده توسط PMU‌ها، یک منحنی مناسب برآش داده و این داده‌ها به صورت ریاضی مدل شده است. این کار علاوه بر کاهش اثر نویز، دقت تخمین را نیز افزایش می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به عنوان یکی از کاربردهای واحدهای اندازه‌گیری فازوری، تخمین پارامترهای مدل کلاسیک ژنراتور سنکرون با استفاده از داده‌های باس ترمینال ژنراتور، بعد از خطاهای سیگنال کوچک مورد بررسی قرار گرفته است. در همین راستا، یک روش مستقیم برای تخمین پارامتر راکتانس حالت گذرای ژنراتور ارائه شده و از معادله اصلاح شده نوسان و روش‌های حداقل مربعات بازگشتی و فیلتر کالمون برای تخمین پارامترهای الکتروموکانیکی ژنراتور؛ شامل ثابت اینرسی، ضریب میرابی و توان مکانیکی، استفاده شده است. روش ارائه شده برای تخمین راکتانس مدل کلاسیک ژنراتور، دارای دقت بسیار بالای بوده و به سهولت قابل پیاده‌سازی می‌باشد. تخمین پارامترهای الکتروموکانیکی با شبیه‌سازی‌های متعدد، اعتبار سنجی شده است. این شبیه‌سازی‌ها نشانگر حساسیت کمتر روش فیلتر کالمون به نویز، نسبت به روش حداقل مربعات بازگشتی می‌باشد. از این رونتای روش فیلتر کالمون دارای اعتبار بیشتری است.

مراجع

- [1] H. Bevrani, M. Watanabe, and Y. Mitani, Power System Monitoring and Control. Wiley-IEEE Press, 2014.
- [2] V. Terzija, G. Valverde, C. Deyu, P. Regulski, V. Madani, J. Fitch, S. Skok, M. M. Begovic, and A. Phadke, "Wide-area Monitoring, Protection and Control of Future Electric Power Networks," Proc. IEEE, vol. 99, no. 1, pp. 80–93, Jan. 2011.
- [3] J. H. Chow, A. C. Chakrabortty, L. Vanfretti, and M. Arcak, "Estimation of Radial Power System Transfer Path Dynamic Parameters Using Synchronized Phasor Data," IEEE Trans. Power Syst., vol. 23, no. 2, pp. 564–571, May 2008.
- [4] A. Chakrabortty, J. H. Chow, and A. Salazar, "Interarea Model Estimation for Radial Power System Transfer Paths with Intermediate Voltage Control Using Synchronized Phasor Measurements," IEEE Trans. Power Syst., vol. 24, no. 3, pp. 1318–1326, Aug. 2009.
- [5] A. Chakrabortty, J. H. Chow, A. Salazar, "A Measurement-Based Framework for Dynamic Equivalencing of Large Power Systems Using Wide-Area Phasor Measurements," IEEE Trans. Smart Grid, vol.2, no.1, pp.68-81, Mar. 2011.
- [6] Y. Wehbe and L. Fan, "Estimation of a Shunted Radial Transfer Path Dynamics Using PMUs," in Proc. IEEE PES Gen. Meet., Jul. 2011.
- [7] Z. Huang, P. Du, D. Kosterev, and B. Yang, "Application of Extended Kalman Filter Techniques for Dynamic Model Parameter Calibration," in Proc. IEEE PES Gen. Meet., pp. 1–8, Jul. 2009.
- [8] K. Kalsi, and et al., "Calibrating Multi-machine Power System Parameters with the Extended Kalman Filter," in Proc. IEEE Power Energy Gen. Meet., Jul. 2011.

جدول (۳): مقادیر خطای تخمین بر حسب درصد برای پارامترهای الکتروموکانیکی مدل کلاسیک ژنراتور سنکرون

فیلتر کالمون	حداقل مربعات بازگشتی	روش
خطای تخمین	مقدار واقعی	پارامتر
۰/۲۸۳	۰/۲۸۸	ثابت اینرسی (H)
-۰/۱۸۶	-۰/۰۱۸۶	ضریب میرابی (D)
-۰/۱۸۶	۰/۰۱۶	توان مکانیکی (P_m)

جدول (۴): مقدار تخمین زده شده و خطای تخمین برای راکتانس حالت گذرای ژنراتور، در مبنای ۹۰۰ مگاوات و ۲۰ کیلو ولت با استفاده از داده‌های نویزی

خطای مقدار تخمین	مقدار تخمین زده شده (درواح)	مقدار واقعی (درواح)	راکتانس حالت گذرا
۰/۲۵	۰/۲۰۰۵	۰/۲	

جدول (۵): مقادیر تخمین زده شده برای پارامترهای الکتروموکانیکی مدل کلاسیک ژنراتور سنکرون در مبنای ۹۰۰ مگاوات و ۲۰ کیلو ولت با استفاده از داده‌های نویزی

فیلتر کالمون	حداقل مربعات بازگشتی	روش
مقدار تخمین زده شده	مقدار تخمین زده شده	پارامتر
۳۰/۱	۳۰/۳۴	ثابت اینرسی (H)
۱۰/۰۶۵	۱۰/۱۱۴	ضریب میرابی (D)
۴۹۹/۰۸۲	۴۹۹/۵۹۷	توان مکانیکی (P_m)

جدول (۶): مقادیر خطای تخمین، بر حسب درصد برای ثابت پارامترهای الکتروموکانیکی مدل کلاسیک ژنراتور سنکرون با استفاده از داده‌های نویزی

فیلتر کالمون	حداقل مربعات بازگشتی	روش
خطای تخمین	مقدار واقعی	پارامتر
-۰/۳۱۹	۱/۱۲۸	ثابت اینرسی (H)
۰/۶۵	۱/۱۱۴	ضریب میرابی (D)
-۰/۱۸۴	-۰/۰۸۱	توان مکانیکی (P_m)

همانگونه که جداول (۲) و (۳) نشان می‌دهند، پارامترهای تخمین زده شده به دو روش حداقل مربعات بازگشتی و فیلتر کالمون، در حالت بدون نویز دارای خطای کمتر از یک درصد می‌باشند. نتایج نمایش داده شده در جداول (۵) و (۶) بیانگر این است که روش فیلتر کالمون نسبت به حداقل مربعات بازگشتی در محیط‌های نویزی عملکرد بهتری داشته و نویز تاثیر کمتری بر نتایج آن دارد. برای کاهش

- [9] L. Fan and Y. Wehbe, "Extended Kalman Filtering Based Real-time Dynamic State and Parameter Estimation Using PMU Data," *Electric Power Systems Research*, Elsevier, vol. 103, pp. 168-177, Jun. 2013.
- [10] Y. Wehbe, and L. Fan, "UKF Based Estimation of Synchronous Generator Electromechanical Parameters from Phasor Measurements," in Proc. North American Power Symposium (NAPS), 2012. IEEE, pp. 1-6, Sep. 2012.
- [11] Y. Wehbe, L. Fan, and Z. Miao, "Least Squares Based Estimation of Synchronous Generator States and Parameters with Phasor Measurement Units," in Proc. North American Power Symposium (NAPS), 2012, pp. 1-6, Sep. 2012.
- [12] B. Mohammadi-Ivatloo, M. Shiroei, M. Parniani, "Online Small Signal Stability Analysis of Multi-machine Test Systems Based on Synchronized Phasor Measurements", *Electric Power System Research*, Elsevier, Vol. 81, pp. 1887-1896, Oct. 2011.
- [13] L. Ljung, *System Identification-Theory for the User*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1987.
- [14] N. Zhou, J. W. Pierre, D. J. Trudnowski, and R. T. Guttromson, "Robust RLS Methods for Online Estimation of Power System Electromechanical Modes," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 3, pp. 1240-1249, Aug. 2007.
- [15] C. Chen, J. Wang, Z. Li, H. Sun, and Z. Wang, "PMU Uncertainty Quantification in Voltage Stability Analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 1,2, Early access.
- [16] G. Welch, and G. Bishop, "An Introduction to the Kalman Filter," TR 95-041, Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill, April 2004.
- [17] S. H. Hosseini, and K. Mohammadi, "Design and Implementation of a Kalman filter-Based Time-Varying Harmonic Analyzer," *Journal of Iranian Association of Electrical & Electronics Engineers*, Vol. 3, No. 2, fall and winter 2006.
- [18] B. Zaker, M. Karrari, M. Mirsalim, G. B. Gharehpetian, and N. Moaddabi, "PMU-Based Matching Pursuit Method for Black-Box Modeling of Synchronous Generator," *Journal of Iranian Association of Electrical & Electronics Engineers*, Vol. 12, No. 3, February 2015.

زیرنویس‌ها

¹ Synchronisms

² GPS: Global Positioning System

³ PMU: Phasor Measurement Unit

⁴ Extended Kalman Filter

⁵ Play Event-Back

⁶ Least Squares Method

⁷ Recursive Least Squares Method

⁸ PSAT: Power System Analysis Toolbox.

