تخمین پارامترهای مدل کلاسیک ژنراتور با استفاده از داده‌های *PMU*

امین ترکاشوند[1] حسن قاسمی[2] فرخ امینی فر[3]

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 رو به رشد 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 فیلترکالمن 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، فیلترکالمن.

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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.8.9]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

۱- مقدمه

مهمترین نیازمندی اندازه‌گیری فازور ولتاژ، تعیین مرجع فازور ولتاژ سینوسی اندازه‌گیری شده در تمام نقاط بوده که با هماهنگ 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 استفاده‌ی 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 تکنیک 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. PMU ها 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، تخمین حالت و تخمین پارامتر برای مدل‌های سیستم قدرت اشاره نمود [۲].

از سوی دیگر مدلسازی ژنراتور نقش مهمی در برنامه‌ریزی، بهره-برداری 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، معمولا براساس تناسب بین پاسخ مدل و پاسخ ژنراتور مربوطه سنجیده می‌شود. تخمین پارامترهای مدل‌های پیچیده‌تر ژنراتور سنکرون همچون مدل درجه‌ی ۶، علاوه بر هزینه‌بر بودن، نیازمند اعمال سیگنال تست به قسمت تحریک وانجام 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. نوآوری این مرجع، در استفاده از تغییرات ولتاژ ناشی از نوسانات بین ناحیه‌ای، به منظور برونیابی 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 مجهز به جبران‌ساز توان راکتیو و سیستم سه ماشینه را تخمین می‌زنند.

مراجع [۷-۹] 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 PMU ها می‌پردازند. اختلاف میان مراجع [۷و۸] با مرجع [۹] 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 بی نشان 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 فیلترکالمن، حداقل مربعات و... به تخمین پارامترها می‌پردازند که این روش‌ها را روش‌های غیرمستقیم می‌نامیم. مراجع [۷-۱۲] نمونه هایی 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 [۳-۶] بدلیل تفکیک روند تخمین پارامترهای الکتریکی و الکترومکانیکی قابلیت اطمینان بالاتری نسبت به روش‌های غیرمستقیم، که پارامترهای الکتریکی و الکترومکانیکی را به صورت همزمان تخمین می‌زند، داشته و درحالت 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 نمی باشند. 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 و 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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.8.9]

گوناگونی استفاده می‌شود. بطور مثال، تحلیل پایداری سیگنال کوچک برای سیستم چند ماشینه با استفاده از مدل کلاسیک ژنراتور، انجام می شود[۱۲]. این مقاله دارای دو نوآوری می‌باشد، در قسمت اول یک روش مستقیم برای تخمین پارامترهای الکتریکی مدل کلاسیک ژنراتور ارائه می‌نماید، که قابلیت اطمینان نتایج آن از روش‌های غیرمستقیم بهتر بوده و با روش‌هایی همچون [۳-۶] برابری می‌کند و از طرفی به توپولوژی شبکه وابسته نمی‌باشد. در قسمت دوم، پارامترهای الکترومکانیکی مدل کلاسیک ژنراتور با استفاده از معادله‌ی اصلاح شده‌ی نوسان بصورت بلادرنگ تخمین زده می‌شود. بدیهی است در مورد یک ژنراتور، بلادرنگ بودن روش امتیازی محسوب 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 الکترومکانیکی موجب شده است که تعداد پارامترهای مجهول مورد استفاده در فیلترکالمن در مقایسه با مراجع [۷-۹] 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 الکترومکانیکی شده است.

پیش از این، پارامترهای الکترومکانیکی به روش‌های حداقل مربعات[۶] و فیلترکالمن توسعه یافته تخمین زده شده‌اند، اما روش حداقل مربعات به تنهایی برای کاربردهای بلادرنگ مناسب نبوده و روش فیلتر کالمن توسعه یافته نسبت به فیلترکالمن پیچیده‌تر است. از این‌رو در این مقاله پارامترهای الکترومکانیکی به روش‌های حداقل مربعات بازگشتی[۷] و فیلتر کالمن تخمین زده می‌شوند. همچنین از آنجا که فیلتر کالمن ساده جوابگوی تخمین پارامترهای الکترومکانیکی می‌باشد، مشتقات 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 داده های PMU جهت تخمین پارامترهای مدنظر استفاده می شود.

ساختار مقاله به ترتیب ذیل می‌باشد: در بخش۲ یک روش مستقیم برای تخمین راکتانس مدل کلاسیک ژنراتور ارائه می‌شود و بخش۳ به تخمین پارامترهای الکترومکانیکی مدل کلاسیک ژنراتور با استفاده از معادله‌ی اصلاح شده‌ی نوسان می‌پردازد. در بخش۴ با تخمین پارامترهای ژنراتور سیستم تک ماشین به شین بینهایت، روش‌های ارائه شده اعتبارسنجی می‌شوند و در نهایت در بخش۵، نتیجه‌گیری مطالعات گزارش می‌شود.

۲- تخمین راکتانس حالت گذرا

هدف از این قسمت ارائه‌ی یک روش برای تخمین راکتانس حالت گذرای مدل کلاسیک ژنراتور با استفاده از داده‌های خطاهای سیگنال کوچک می‌باشد، که داده‌های آن توسط PMU ها 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 (۳) به هم مربوط می‌شوند:

$$\tilde{E} = V + jx'_d \tilde{I} \qquad (۱)$$

$$\tilde{E} = V + jx'_d \left(\frac{P - jQ}{V}\right) \qquad (۲)$$

$$\tilde{E} = \left(V + x'_d \frac{Q}{V}\right) + jx'_d \left(\frac{P}{V}\right) \qquad (۳)$$

در روابط فوق، P و Q *به ترتیب* توان‌های اکتیو و راکتیو اندازه-گیری شده، V ولتاژ اندازه‌گیری شده در ترمینال ژنراتور و x_d' راکتانس حالت گذرای ژنراتور می‌باشند. اندازه‌ی مربع ولتاژ درونی ژنراتور از رابطه‌ی (۴) قابل محاسبه می‌باشد:

$$E^2 = \left(V + x'_d \frac{Q}{V}\right)^2 + x'^2_d \left(\frac{P}{V}\right)^2 \qquad (۴)$$

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

$$E^2 = V^2 + x'^2_d \left(\frac{P^2 + Q^2}{V^2}\right) + 2x'_d Q \qquad (۵)$$

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:

$$0 = \frac{d\left(V^2\right)}{dt} + x'^2_d \frac{dS_1}{dt} + 2x'_d \frac{dQ}{dt} \qquad (۶)$$

در رابطه‌ی فوق:

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

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

$$-\frac{d\left(V^2\right)/dt}{dS_1/dt} = x'^2_d + 2x'_d \frac{dQ/dt}{dS_1/dt} \qquad (۷)$$

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

$$-\frac{d\left(V^2\right)/dt}{dS_1/dt} + \left(\frac{dQ/dt}{dS_1/dt}\right)^2 = x'^2_d + 2x'_d \frac{dQ/dt}{dS_1/dt} + \left(\frac{dQ/dt}{dS_1/dt}\right)^2 \qquad (۸)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.8.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

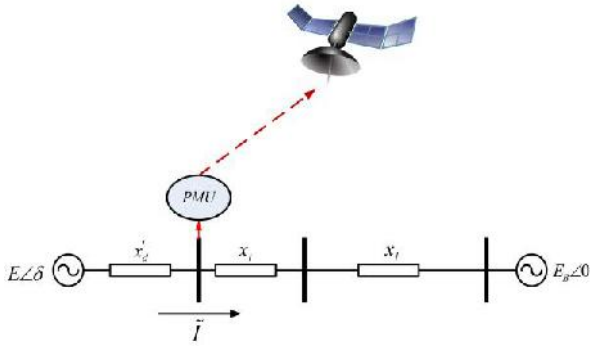
$$\left(x'_d+\frac{dQ/dt}{dS_1/dt}\right)^2=\left(\frac{dQ/dt}{dS_1/dt}\right)^2-\frac{d\left(V^2\right)/dt}{dS_1/dt} \qquad (۹)$$

بنابراین، مقدار راکتانس حالت گذرای 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 می‌آید:

$$x'_d=\sqrt{U_1}-T_1 \qquad (۱۰)$$

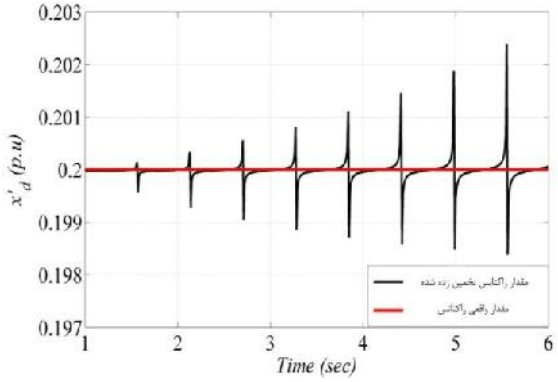
که در رابطه‌ی فوق:

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



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 می‌توان از رابطه‌ی (۱) محاسبه نمود. شکل(۲) مقادیر تخمین زده شده را برای بازه‌ی زمانی ۵ ثانیه بعد از خطا نمایش می‌دهد. دیده‌شود که در زمان‌های ابتدائی پس از خطا که دامنه‌ی تغییرات زیاد است، مقادیر تخمین زده شده دارای دقت بالاتری می‌باشند. ضربه‌های دیده شده در شکل(۲)، با فرکانس نوسانات توان و ولتاژ تکرار می‌شود. با میانگین گرفتن از مقادیر تخمین زده شده‌ی بین ضربه‌ها، می‌توان دقت و مقاوم بودن روش را در برابر نویز افزایش داد.



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

۳- تخمین پارامترهای الکترومکانیکی

در این قسمت دو روش به منظور تخمین پارامترهای الکترومکانیکی 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 روش ها قابل تخمین می باشد و لذا در ادامه با مسامحه، از آن نیز به عنوان پارامترهای الکترومکانیکی یاد می شود. به منظور تخمین این پارامترها، از داده‌های ترمینال ژنراتور شامل توان و فرکانس که توسط PMU ها جمع آوری شده است، استفاده می‌شود. داده‌های جمع آوری شده به بعد از وقوع خطاهای سیگنال کوچک که منجر به نوسانات فرکانس و توان می‌شود، مربوط می‌باشند. سپس با استفاده از این داده‌ها، معادله‌ی نوسان اصلاح شده و روش‌های حداقل مربعات بازگشتی و فیلترکالمن، پارامترهای الکترومکانیکی تخمین زده می‌شود.

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

$$2Hf\frac{df}{dt}+D\Delta f=P_m-P_e \qquad (۱۱)$$

در معادله‌ی فوق،f فرکانس، H ثابت اینرسی، D ضریب میرایی، Pm توان مکانیکی ورودی و Pe توان الکتریکی خروجی می‌باشد. شایان ذکر است که این معادله عبارت دقیق معادله نوسان می‌باشد و تفاوت آن با معادله نوسان تقریبی که پیشتر در مراجع [۶-۱۱] مورد استفاده قرار گرفته، ضریب فرکانس در ثابت اینرسی می‌باشد که در رابطه‌ی (۱۱) با رنگ قرمز نمایش داده شده است. بدیهی است که استفاده از معادله‌ی نوسان اصلاح شده، موجب بهبود دقت تخمین پارامترهای الکترومکانیکی می‌شود.

در همین راستا از روش‌های بازگشتی استفاده می‌شود، روش‌های بازگشتی به مقدار اولیه‌ای برای پارامترهای مورد نظر برای تخمین و کوواریانس خطا برای این پارامترها نیاز دارند. برای تعیین مقدار اولیه برای روش‌های بازگشتی، داده‌های جمع آوری شده از PMU ها به دو قسمت تقسیم می‌شود؛ از دسته‌ی اول داده‌ها با کمک روش حداقل مربعات، برای محاسبه‌ی مقادیر اولیه‌ی پارامترها و ماتریس کوواریانس خطا استفاده می‌شود و از دسته‌ی دوم داده‌ها با هدف تخمین دقیق‌تر پارامترهای الکترومکانیکی و پایش بلادرنگ این پارامترها استفاده می‌شود. دسته‌ی دوم داده‌های جمع آوری شده، ورودی روش‌های بازگشتی محسوب می‌شوند.

چنانچه t_0 زمان شروع ثبت داده‌ها و ابتدای دسته‌ی اول داده‌ها و t انتهای این دسته باشد، مقدار اولیه‌ی 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 می‌دهد [۱۳].

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.8.9]

$$\hat{\theta}(t)=\left(X^T(t)X(t)\right)^{-1}X^T(t)Y(t) \quad (۱۲)$$

$$P(t)=X^T(t)X(t) \quad (۱۳)$$

$$X(t)=\{x(\tau),y(\tau)\}_{\tau=t_0}^{t} \quad (۱۴)$$

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، $\theta(t)$ مقادیر تخمین زده شده بازای اطلاعات دریافت شده تا زمان t می‌باشد.

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

روش‌های بازگشتی تخمین، معمولا 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 [۱۴و۱۵].

۳-۱-۱- 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 می کند. 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 می گیریم:

$$X(t+1)=\{x(t+1),y(t+1)\}\cup X(t) \quad (۱۵)$$

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

$$X(t+1)=\begin{pmatrix}X(t)\\ x^T(t+1)\end{pmatrix},\quad Y(t+1)=\begin{pmatrix}Y(t)\\ y(t+1)\end{pmatrix} \quad (۱۶)$$

$$P(t+1)=P(t)-\frac{P(t)x(t+1)x^T(t+1)P(t)}{1+x^T(t+1)P(t)x(t+1)} \quad (۱۷)$$

$$\varepsilon(t+1)=y(t+1)-x^T(t+1)\hat{\theta}(t) \quad (۱۸)$$

$$\hat{\theta}(t+1)=\hat{\theta}(t)+P(t+1)x(t+1)\varepsilon(t+1) \quad (۱۹)$$

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

۳-۱-۲- تخمین پارامترهای الکترومکانیکی ژنراتور با استفاده از حداقل مربعات بازگشتی

چنانچه بخواهیم به روش حداقل مربعات بازگشتی، پارامترهایی ازقبیل 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:

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

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

$$Y(t)=\begin{bmatrix}P_e(1)\\ \vdots\\ P_e(t)\end{bmatrix},\quad y(t+1)=P_e(t+1) \quad (۲۰)$$

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

$$\hat{\theta}(t)=\begin{bmatrix}H(t)\\ D(t)\\ P_m(t)\end{bmatrix} \quad (۲۱)$$

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 گاورنر 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.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.8.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

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

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

۳-۲-۱- فیلترکالمن [۱۶و۱۷]

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:

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

$$z_k = H_z x_k + v_k \qquad (۲۲)$$

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.

z_k: مقادیر اندازه‌گیری شده از سیستم می‌باشد.

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

w_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 ونویز اندازه‌گیری دارای توزیع احتمالاتی نرمال با میانگین صفر و کوواریانس Q و R باشند. همچنین مقادیر این نویزها را مستقل از هم فرض می‌کنیم. در عمل کوواریانس نویز فرایند Q و کوواریانس نویز اندازه‌گیری R ممکن است بازای هر گام زمانی و یا هر نمونه‌ی اندازه‌گیری تغییر کند، اما دراینجا مقادیر آنها را ثابت فرض می‌کنیم. فرایند فیلتر کالمن برای مدل‌های گسسته‌ی 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:

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

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \qquad (۲۳)$$

معادلات تصحیح کننده:

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

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + G_k\left(z_k - H_z\hat{x}_k^-\right) \qquad (۲۴)$$

$$P_k = \left(I - G_k H_z\right)P_k^-$$

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^- و P_k مقادیر 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 مقادیر اولیه‌ی پارامترها و ماتریس کوواریانس با استفاده از روش حداقل مربعات.
۳. نوشتن اطلاعات و معادلات سیستم به فرم تعریف شده برای فیلترکالمن و وارد نمودن مقادیر اولیه‌ی محاسبه شده از گام قبلی.
۴. محاسبه‌ی مقادیر پیش‌بینی شده برای پارامترها و کوواریانس خطای آنها.
۵. محاسبه‌ی بهره‌ی فیلتر کالمن با اطلاعات بدست آمده از مرحله‌ی پیش‌بینی.
۶. محاسبه‌ی اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی واقعی با مقادیر بدست آمده از مدل تخمین زده شده برای سیستم.
۷. اصلاح مقادیر تخمین زده شده و کوواریانس خطای آنها با استفاده از اطلاعات بدست آمده از مراحل قبل.
۸. تکرار مراحل 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 مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر تخمین زده شده بوسیله‌ی مدل سیستم، به صفر میل کند.

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

در این قسمت به جزئیات ریاضی مدل فیلترکالمن، 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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.8.9]

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

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

$$D_{k+1} = D_k + w_2 \qquad (۲۵)$$

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

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

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (۲۶)$$

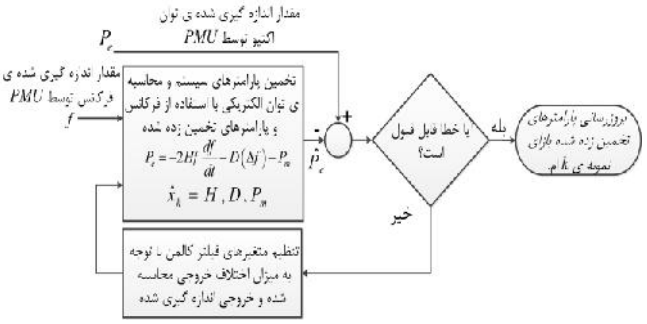
ماتریس حساسیت اندازه‌گیری H_z را می‌توان به فرم معادله‌ی (۲۷) نوشت:

$$H_z = \begin{bmatrix} -2 f_k \dfrac{df_k}{dt} & -\Delta f_k & -1 \end{bmatrix} \qquad (۲۷)$$

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

$$\hat{x}_k = \begin{bmatrix} H_k \\ D_k \\ P_{m,k} \end{bmatrix}, \qquad z_k = P_{e,k} \qquad (۲۸)$$

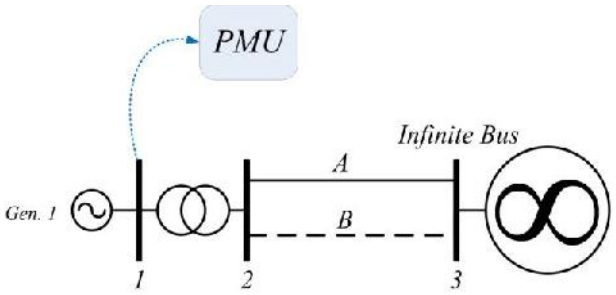
به منظور بهبود عملکرد روند تخمین با استفاده از فیلتر کالمن، از تکنیک بازتکرار رویداد در تنظیم بهره‌ی فیلتر کالمن استفاده شده است. شکل(۳) روند تخمین پارامترهای H، D و P_m را با استفاده از الگوریتم فیلترکالمن و تکنیک مجزاسازی مدل نمایش می‌دهد. همانگونه که در شکل(۳) مشهود است، فرکانس نقش ورودی مدل را داشته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



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

۴- شبیه‌سازی

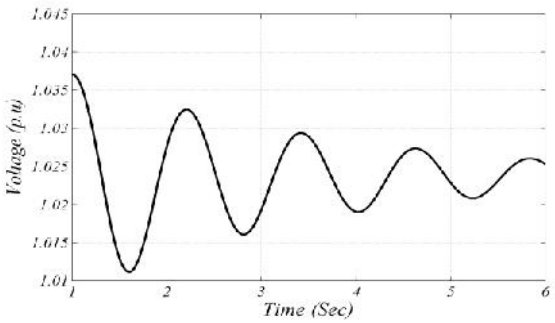
به منظور اعتبارسنجی روش‌های ارائه شده، سیستم تک ژنراتور را که با دو خط موازی به شین بینهایت متصل شده است را در نرم‌افزار PSAT[۸] شبیه‌سازی نموده و از داده‌های باس۱، به منظور تخمین پارامترهای ژنراتور استفاده می‌کنیم. منظور از شین بینهایت سیستم قدرت بزرگی است که تحت تاثیر ماشین مورد مطالعه قرار نمی‌گیرد. شایان ذکر است که داده‌های مورد نیاز برای فرایند تخمین، از شبیه‌سازی مدل کلاسیک ژنراتور در محیط نرم افزار PSAT 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 باس ژنراتور در نظر گرفته شده است.



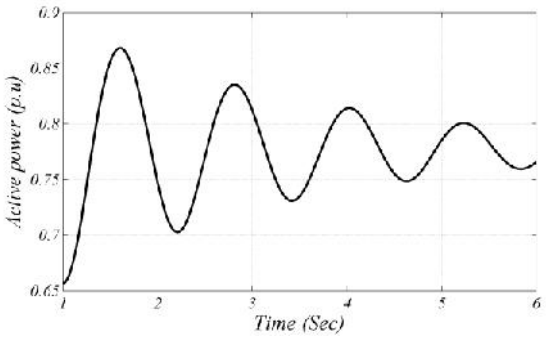
شکل (۴): شماتیک سیستم تک ماشین متصل به شین بینهایت.

قطع خط B، نوسانات فرکانس و توان را به دنبال دارد. با استفاده از داده‌های این نوسانات، که بوسیله‌ی PMU فراهم شده است، مقادیر راکتانس حالت گذرا، ثابت اینرسی، ضریب میرایی و توان مکانیکی اعمال شده به ژنراتور۱ تخمین زده می‌شود. از آنجا که ژنراتور۱ 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 خطا نمایش می‌دهند. نوسان شکل موج‌های ولتاژ و توان‌های اکتیو و راکتیو از نوسانات سرعت روتور ژنراتور نشات می گیرد 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.

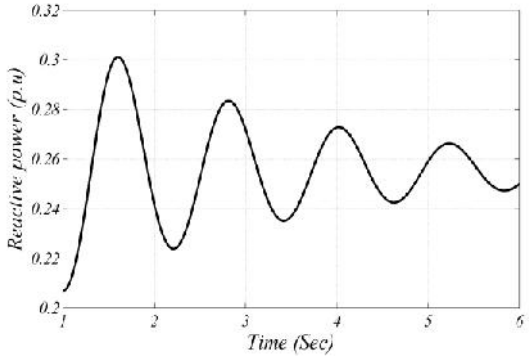
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.8.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017



شکل (۵): شکل موج تغییرات ولتاژ ترمینال ژنراتور پس از خطا بر مبنای ۲۰ کیلو ولت.

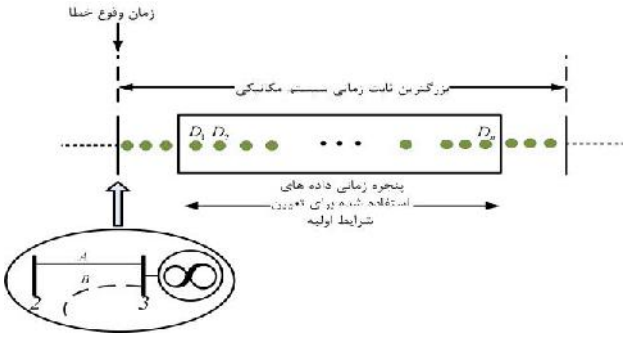


شکل (۶): شکل موج تغییرات توان اکتیو ترمینال ژنراتور پس از خطا بر حسب واحد با مبنای ۹۰۰ مگاولت آمپر.



شکل (۷): شکل موج تغییرات توان راکتیو ترمینال ژنراتور پس از خطا بر حسب واحد با مبنای ۹۰۰ مگاولت آمپر.

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 یا 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 فیلترکالمن 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.



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

جدول(۱) مقدار تخمینی برای راکتانس حالت گذارای ژنراتور۱ 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) مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر تخمین زده شده برای ثابت اینرسی، ضریب میرایی و توان مکانیکی ژنراتور۱ را به دو روش حداقل مربعات بازگشتی و فیلترکالمن با یکدیگر مقایسه کرده و جدول(۳) مقادیر خطای تخمین این سه پارامتر را بازای دو روش حداقل مربعات بازگشتی و فیلترکالمن با هم مقایسه می‌کند.

مقادیر راکتانس و پارامترهای الکترومکانیکی برای داده‌های آلوده به نویز سفید گوسی با سیگنال به نویز ۸۰ 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 فیلترکالمن با یکدیگر مقایسه می‌کند.

جدول (۱):مقدار تخمین زده شده و خطای تخمین برای راکتانس حالت گذرای ژنراتور، در مبنای ۹۰۰ مگاوات و ۲۰ کیلو ولت.

	مقدار واقعی (درواحد)	مقدار تخمین زده شده (درواحد)	خطای مقدار تخمین
راکتانس حالت گذرا	۰/۲	۰/۲	۰/۰۰۳

جدول (۲):مقادیر تخمین‌زده شده برای پارامترهای الکترومکانیکی مدل کلاسیک ژنراتور سنکرون در مبنای ۹۰۰ مگاوات و ۲۰کیلو ولت.

روش		حداقل مربعات بازگشتی	فیلترکالمن
پارامتر	مقدار واقعی	مقدار تخمین زده شده	مقدار تخمین زده شده
ثابت اینرسی (H)	۳ ثانیه	۳/۰۰۹	۳/۰۰۸
ضریب میرایی (D)	۱۰	۹/۹۸	۹/۹۸۱
توان مکانیکی (P_m)	۵۰۰ مگاوات	۵۰۰/۰۸	۴۹۹/۰۸۳

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.8.9]

جدول (۳): مقادیر خطای تخمین برحسب درصد برای پارامترهای الکترومکانیکی مدل کلاسیک ژنراتور سنکرون

روش		حداقل مربعات بازگشتی	فیلترکالمن
پارامتر	مقدار واقعی	خطای تخمین	خطای تخمین
ثابت اینرسی (H)	۳ ثانیه	۰/۲۸۸	۰/۲۸۳
ضریب میرایی (D)	۱۰	-۰/۱۸۶	-۰/۱۸۶
توان مکانیکی (P_m)	۵۰۰ مگاوات	۰/۰۱۶	-۰/۱۸۶

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

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

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

روش		حداقل مربعات بازگشتی	فیلترکالمن
پارامتر	مقدار واقعی	مقدار تخمین زده شده	مقدار تخمین زده شده
ثابت اینرسی (H)	۳ ثانیه	۳/۰۳۴	۳/۰۱
ضریب میرایی (D)	۱۰	۱۰/۱۱۴	۱۰/۰۶۵
توان مکانیکی (P_m)	۵۰۰ مگاوات	۴۹۹/۵۹۷	۴۹۹/۰۸۲

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

روش		حداقل مربعات بازگشتی	فیلترکالمن
پارامتر	مقدار واقعی	خطای تخمین	خطای تخمین
ثابت اینرسی (H)	۳ ثانیه	۱/۱۲۸	-۰/۳۱۹
ضریب میرایی (D)	۱۰	۱/۱۴	۰/۶۵
توان مکانیکی (P_m)	۵۰۰ مگاوات	-۰/۰۸۱	-۰/۱۸۴

همانگونه که جداول (۲) و (۳) نشان می‌دهند، پارامترهای تخمین زده شده به دو روش حداقل مربعات بازگشتی و فیلتر کالمن، 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 فیلترکالمن نسبت به حداقل مربعات بازگشتی در محیط‌های نویزی عملکرد بهتری داشته و نویز تاثیر کمتری بر نتایج آن دارد. برای کاهش مشکل نویز و داده‌های پرت، به داده‌های اندازه‌گیری شده توسط PMU ها، یک منحنی مناسب برازش 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 داده-های 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 کالمن برای تخمین پارامترهای الکترومکانیکی ژنراتور؛ شامل ثابت اینرسی، ضریب میرایی و توان مکانیکی، استفاده شده است.

روش ارائه شده برای تخمین راکتانس مدل کلاسیک ژنراتور، دارای دقت بسیار بالایی بوده و به سهولت قابل پیاده‌سازی می‌باشد. تخمین پارامترهای الکترومکانیکی با شبیه‌سازی‌های متعدد، اعتبار سنجی شده است. این شبیه‌سازی‌ها نشانگر حساسیت کمتر روش فیلترکالمن به نویز، نسبت به روش حداقل مربعات بازگشتی می‌باشد. از این‌رو نتایج روش فیلترکالمن 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.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.8.9]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

[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, “On-line 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.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.8.9]