تاثیر مدلسازی دینامیکی بار بر پایداری شبکه و تخمین پارامترهای مدل دینامیکی انتخابی با فیلتر کالمن

عارف درودی[1]، استادیار، هانیه نوری[2]، دانشجو

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شاهد- تهران- ایران
Doroudi@shahed.ac.ir –
۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شاهد - تهران- ایران
Noori.h2020@gmail.com –

چکیده: **سیستمهای قدرت بطور پیوسته در معرض اختلالات کوچک یا بزرگ قرار دارند. وقوع اختلال در سیستم قدرت باعث تحریک مودهای سیستم از جمله مودهای الکترومکانیکی شده و در نتیجه کمیتهای سیستم دچار نوسانات گذرا می‌شوند. برای بررسی این پدیده‌ها مدلسازی دقیق تمامی تجهیزات سیستم از جمله بارها دارای اهمیت فراوانی است. در این مقاله اهمیت و تأثیر انواع مدلهای بار بر روی پایداری زاویه بار یک شبکه قدرت نمونه مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا با مطالعه انواع مدل‌های بار نشان داده خواهد شد که مدلسازی دینامیکی بار بر پایداری سیستم تاثیر گذار است. سپس با انتخاب بهترین مدل دینامیکی و استفاده از فیلتر کالمن بدون دنباله (UKF) پارامترهای مدل با استفاده از روش "بازخوانی رخداد" و تزریق ولتاژ و فرکانس ایجاد شده بعد از اغتشاش به شینه مورد نظر تخمین زده می‌شوند.**

واژه های کلیدی: **مدلسازی بار، تخمین پارامتر، مدل های بار دینامیکی، فیلتر کالمن**

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۵/۰۹/۲۳
تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۶/۰۷/۰۴
نام نویسنده‌ی مسئول : عارف درودی
نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران - تهران - ابتدای آزاد راه تهران قم - روبروی حرم مطهر امام خمینی (ره) - دانشگاه شاهد - دانشکده فنی ومهندسی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.3.2]

۱- مقدمه

هدف از طراحی، اجرا و توسعه شبکه برق و به طور کلی سیستم‌های قدرت، تولید توان الکتریکی و تحویل آن با کیفیتی مناسب به مصرف‌کننده است. به عبارت دیگر بهره‌برداری پایدار از سیستم‌های قدرت مستلزم توانایی آنها در حفظ تعادل بین توان‌های الکتریکی خروجی نیروگاه ها و بارهای الکتریکی سیستم است.

بارها یا مصرف کنندگان انرژی یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین اجزا شبکه‌های قدرت هستند که از تغییرات پارامترهای شبکه نظیر ولتاژ و فرکانس تاثیر می‌پذیرند. همان گونه که بارها از تغییر پارامترهای شبکه تاثیر می‌پذیرند و تامین ولتاژ با فرکانس ثابت برای آنها مهم است، خود هم به نوعی بر روی این پارامترها تاثیرگذار هستند.

طراحی مناسب و عملکرد ایمن شبکه های قدرت به شدت به مطالعات دینامیکی آنها وابسته بوده و لذا داشتن اطلاعات کافی از تمامی اجزای متصل به شبکه ضروری خواهد بود. برای بهبود دقت مطالعات دینامیکی موارد زیر نیاز خواهند بود:

- انتخاب یک مدل مناسب و دقیق برای هر یک از تجهیزات
- تعیین دقیق پارامترهای مدل

تاکنون مطالعات فراوانی در خصوص ارائه مدلهای دقیق و تعیین پارامترهای مدل برای تجهیزات مختلف موجود در شبکه‌های قدرت انجام گرفته است. یکی از اجزا مهم شبکه بارهای الکتریکی هستند. در مدل سازی بار با یک فرآیند پیچیده روبرو هستیم و علت آن را می‌توان به اختصار اینگونه برشمرد:

- در مدل‌سازی مجموع بارهای متصل به یک شینه با وسایل متنوع از قبیل تجهیزات روشنایی، کمپرسورها، گرم‌کننده‌ها، موتورها (القایی،DC)، کوره‌های القایی و غیره روبرو هستیم (مشخصه تصادفی بودن بارها).

- از طرفی ممکن است که این ترکیب تحت تاثیر عواملی از قبیل زمان (ساعت، روز، ماه، ایام تعطیل)، وضعیت آب و هوا و وضعیت اقتصادی تغییر نماید (متغیر با زمان بودن بارها).

با توجه به مشخصه‌های بار دو نوع مدلسازی دینامیکی و استاتیکی امکان‌پذیر است. مدلسازی دینامیکی دقیق تر بوده ولی در برخی مواقع به دلیل هزینه محاسباتی از مدلسازی استاتیکی استفاده می‌شود. در هر صورت در زمان وقوع اعوجاج در شبکه و در هنگام انجام مطالعات دینامیکی و پایداری، مدل‌های استاتیکی جوابگوی حالت دینامیکی بار نبوده و نتایج عملی با نتایج شبیه‌سازی تطبیق مناسبی ندارند.

بعلاوه، مقدارقابل توجهی از بارها در سیستم، موتورالقایی هستند. یک سیستم واقعی ممکن است شامل هزاران موتور باشد. بنابراین مدل‌سازی صحیح (دقیق) بار در تحلیل دینامیکی بسیار پیچیده است و نیازمند برخی ساده‌سازی‌ها است. برای کاهش پیچیدگی مدلسازی بار، گاهی همه موتورهای القایی متصل شده به یک شینه را به صورت یک موتور معادل مدل می‌کنند.

یکی دیگر از مدل‌های دینامیکی بار که در نرم‌افزارها و مقالات متعدد برای مطالعات پایداری مورد استفاده قرار گرفته است، مدل بازیابی نمایی بار (ERL[۱]) نام دارد[1]. مدل فوق ضمن پاسخگویی مناسب در شرایط مختلف شبکه به دلیل تعداد کم پارامتر های آن، در پروسه تخمین بر اساس نتایج اندازه‌گیری نیز مشکلات کمتری را بروز می‌دهد[2].

از طرف دیگر، مدلسازی بار و تخمین پارامترهای آن می‌تواند مبتنی بر دو اصل انجام گیرد:

۱- روش های مبتنی بر اجزا : در این حالت اطلاعات تک تک بار ها جمع آوری شده و سپس با ترکیب آن ها، مشخصه بار ترکیبی به صورت یک بار منفرد جایگزین می شود.

۲- روش های مبتنی بر اندازه‌گیری: از اطلاعات اندازه‌گیری شده مانند ولتاژ، فرکانس و توان های اکتیو و راکتیو در حالتی که شبکه تحت یک اعوجاج قرار می‌گیرد استفاده می‌شود. این اطلاعات برای تنظیم پارامترهای مدل به نحوی مورد استفاده قرار می‌گیرند تا عدم تطابق بین پاسخ واقعی و مدل انتخابی را کاهش دهند.

امروزه با توجه به وسایل اندازه گیری جدید مانند PMUها، روش دوم بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. این دستگاه‌ها عموماً در شینه‌های کلیدی شبکه نصب شده و دینامیک سیستم را مونیتور می‌کنند. اولین قدم در مدلسازی هر تجهیز در روش های مبتنی بر اندازه گیری، انتخاب مدلی مناسب برای آن تجهیز است. در قدم دوم می بایستی پارامترهای آن مدل را مبتنی بر شرایط واقعی سیستم با استفاده از یک استراتژی خاص انتخاب وتنظیم نمود. این امر چالش برانگیز بوده چرا که مدل‌های انتخابی عمدتا غیرخطی و دارای پارامترهای زیادی هستند.

تاکنون روش های مختلفی برای تخمین پارامترهای بار ارائه شده است که از جمله آن‌ها می توان به روش های مبتنی بر تکنیک‌های آماری و حداقل مربعات[3]، روش های هوش مصنوعی مانند الگوریتم PSO[4,5] , شبکه های عصبی[6] اشاره نمود. این روشها عمدتا به شکل offline پارامترهای بار را تخمین می‌زنند. با توجه به ماهیت تصادفی بار و تغییرات آن و همچنین کنترل مستمر و پیوسته کلیه

[۱] Exponential Recovery Load

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.3.2]

منابع در شبکه‌های نوین [7]، مدلسازی دینامیکی و online کلیه اجزا شبکه من‌جمله بارهای آن ضروری خواهد بود.

در این مقاله برای اولین بار از فیلتر کالمن بدون دنباله (UKF[1]) برای تنظیم و کالیبراسیون پارامترهای مدل انتخابی بار استفاده خواهد شد. این نوع فیلتر در برابر نویزها و عدم دقت دستگاه‌های اندازه‌گیری مقاوم بوده و نرخ همگرایی آن بسیار مطلوب است [8].

در این مقاله ابتدا با معرفی انواع مدل های استاتیکی و دینامیکی بار و توسط شبیه سازی نشان داده خواهد شد که در مطالعات پایداری گذرا، مدل سازی دینامیکی بار روی نتایج حاصله تاثیر قابل ملاحظه‌ای دارد. در ادامه و در جهت مدل سازی بار و تخمین پارامترهای مدل آن از روش بازخوانی واقعه و تزریق ولتاژ اندازه‌گیری شده به شینه مورد بحث و فیلتر کالمن بدون دنباله بهره گرفته خواهد شد و عملکرد مدل ارائه شده با شبیه سازی های متعدد مورد بررسی قرار می گیرد.

۲- مدلسازی بار

مدلسازی بار از جایگاه بالایی در طراحی، اجرا و توسعه سیستم‌های قدرت الکتریکی برخوردار است. در طراحی اولیه هر سیستم قدرت و مطالعات پایداری و دینامیکی مدل، دقیق بار نقش و تاثیر بسزایی دارد [۹].

۲-۱- مدل های استاندارد بار

مدلسازی بار در واقع توصیف ریاضی مربوط به ولتاژ و فرکانس اندازه‌گیری شده در یک شینه و میزان مصرف توان اکتیو و راکتیو توسط بار است. با توجه به تنوع و گستردگی بالای بارهای سیستم قدرت ارائه یک مدل دقیق بسیار مشکل است[۱۰]. در این خصوص روشهای متفاوتی تاکنون ارائه شده است. اما دو دسته‌بندی اصلی شامل مدلسازی استاتیک و دینامیک است. مدل استاتیک بار به زمان وابسته نبوده و در نتیجه می‌توان رابطه بین توان اکتیو و راکتیو درهر لحظه از زمان را با ولتاژ و فرکانس در همان زمان توصیف نمود. از طرف دیگر مدل دینامیک بار چنین رابطه‌ای را در هر لحظه از زمان و به وسیله تابعی از ولتاژ و فرکانس توصیف می‌کند.

۲-۱-۱- مدل های استاتیک بار

مدلهای استاتیکی بار متداول برای توان اکتیو و راکتیو به صورت چند جمله‌ای یا نمایی بوده و در صورتی که لازم باشد می‌تواند شامل یک ترم وابستگی فرکانس نیز باشد[۱۱]. خلاصه‌ای از این مدل‌ها در ادامه آمده است.

- مدل ZIP یا چند جمله‌ای

خصوصیات استاتیک بار را می‌توان به توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت و با توجه به نوع وابستگی توان‌های اکتیو و راکتیو به ولتاژ دسته بندی کرد. در مورد یک بار امپدانس ثابت وابستگی توان به ولتاژ به صورت یک تابع درجه ۲ ، برای جریان ثابت به صورت خطی و برای توان ثابت، توان بار به ولتاژ وابستگی ندارد. معادلات (۱) و (۲)، مجموع سه دسته‌بندی اخیر را نشان می‌دهند.

$$P = P_0\left[a_1\left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + a_2\left(\frac{V}{V_0}\right) + a_3\right] \quad (1)$$

$$Q = Q_0\left[a_4\left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + a_5\left(\frac{V}{V_0}\right) + a_6\right] \quad (2)$$

که در آن Q_0, P_0, V_0 به ترتیب مقادیر اولیه ولتاژ، توان اکتیو، توان راکتیو از سیستم مورد مطالعه و ضرایب a_1 تا a_6 پارامترهای مدل را نشان می‌دهند.

- مدل بار نمایی

معادلات (۳) و (۴) وابستگی توان با ولتاژ را به صورت تابعی نمایی بیان می‌کنند.

$$P = P_0\left(\frac{V}{V_0}\right)^{n_p} \quad (3)$$

$$Q = Q_0\left(\frac{V}{V_0}\right)^{n_q} \quad (4)$$

پارامترهای این مدل n_p و n_q هستند..

- مدل بار فرکانسی

مدل های ارائه شده در بالا می توانند دارای یک ترم وابستگی فرکانس نیز باشند و آن هم با ضرب کردن معادلات فوق در یک فاکتور به فرم (۵) انجام می گیرد.

$$1 + A(f - f_0) \quad (5)$$

f_0 فرکانس نامی شبکه بوده و A نشان دهنده حساسیت فرکانسی مدل است.

۲-۱-۲- مدل های دینامیک بار

هنگامی که مدل های استاتیک بار مرسوم برای نمایش رفتار بار کافی نیست استفاده از مدلهای دینامیکی پیشنهاد می‌گردد. پارامترهای چنین مدل‌هایی می‌توانند با استفاده از روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری و به وسیله مشاهده پاسخ بار به عنوان نتیجه‌ای از تغییرات سیستم یا با استفاده از روش های مبتنی بر اجزاء محاسبه شوند. معروفترین نوع مدل‌های دینامیکی، مدل ERL است که به وسیله دسته‌ای از معادلات

[1] Unscented Kalman Filter

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

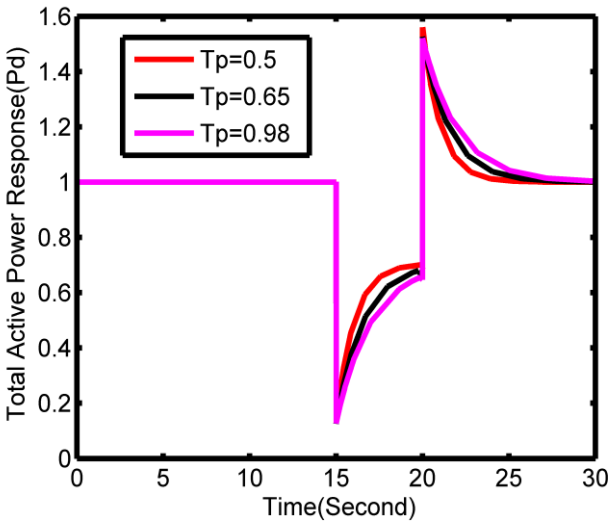
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.3.2]

غیرخطی به فرم معادلات (۶) و (۷) نشان داده شده است. دراین مدل توان اکتیو و راکتیو رابطه‌ای غیرخطی با ولتاژ دارند[۱۲].

$$T_p \frac{dP_r}{dt} + P_r = P_0(\frac{V}{V_0})^{\alpha_s} - P_0(\frac{V}{V_0})^{\alpha_t} \quad (6)$$

$$P_d = P_r + P_0(\frac{V}{V_0})^{\alpha_t} \quad (7)$$

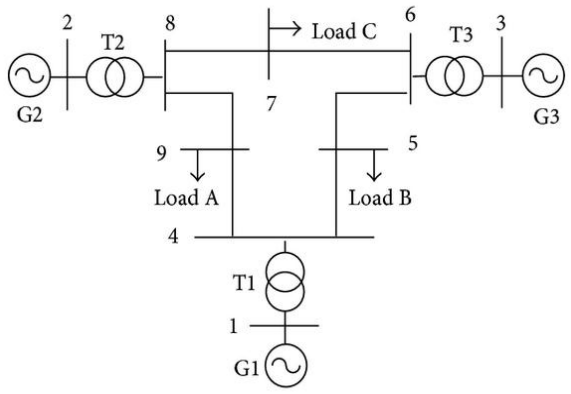
در این مدل، P_r و P_{d0} به ترتیب بازیابی توان اکتیو و راکتیو مصرفی، α_s و α_t به ترتیب وابستگی ولتاژ- بار اکتیو در حالت مانا و وابستگی ولتاژ- بار راکتیو در حالت گذرا را نشان می‌دهند. T_p مدت زمانی است که توان نیاز دارد تا به 63 درصد مقدار نهایی خود برسد. تغییر در ولتاژ باعث تغییر توان اکتیو مصرفی می‌گردد. به دنبال این، شبکه به سمت یک مقدار مانا میل کرده و برای رسیدن به این مقدار به اندازه T_p زمان نیاز دارد. شکل (۱) تاثیر تغییرات ولتاژ بر بار اکتیو در T_p های مختلف نشان می‌دهد. فرض شده است که ولتاژ در لحظه t=15s از مقدار 1pu به 0.4pu افت نموده و مجددا در t=20s به مقدار اولیه خود باز می‌گردد. همانطور که این شکل نشان می‌دهد مادامی که Tp افزایش می‌یابد، پاسخ بار دیرتر به نقطه نهایی خود می‌رسد.



شکل (۱): تاثیرمقادیر مختلف پارامتر *Tp* بر پاسخ بار اکتیو

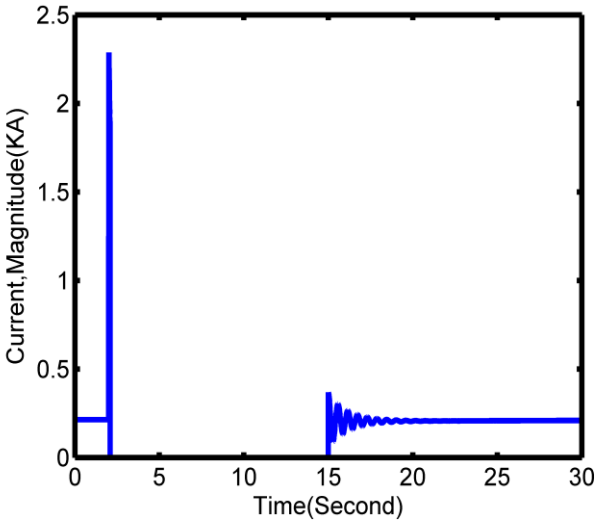
۳- تاثیر مدلسازی دینامیکی بار بر روی پایداری سیستم

در این قسمت نشان خواهیم داد که مدلسازی بار می‌تواند تاثیر قابل ملاحظه ای بر مطالعات دینامیکی و پایداری سیستم داشته باشد. برای نشان دادن این تاثیر از یک سیستم ۹ شینه سه ماشینه که در شکل(۲) نمایش داده شده است استفاده می‌کنیم. شبیه‌سازی ها با استفاده از نرم افزار Digsilent انجام می‌گیرد. پارامترهای سیستم در مراجع[13,14] آمده است. در مطالعات ژنراتور شماره ۱، به عنوان ژنراتور مرجع در نظر گرفته شده است.



شکل(۲): دیاگرام سیستم سه ماشین، ۹ شینه در نرم افزار Digsilent

تحلیل پایداری گذرای سیستم با ردیابی زاویه بار ژنراتورها، به دنبال یک اغتشاش بزرگ انجام می‌گیرد. در این شبیه‌سازی اتصال کوتاه سه‌فازی در t=2s بر روی ۰.۰۱ خط 8-9 ایجاد می‌شود، پس از گذشت چند سیکل، خط باز می شود؛ سپس در t=2.6s خطا رفع شده و در t=15s مجددا خط را می‌بندیم. شکل(۳) جریان خط8-9 را در پیش و پس از این رخداد نمایش می‌دهد.



شکل(۳): جریان خط 8-9 برای یک حالت پایدار گذرا

باید اشاره کرد که در تمام شبیه‌سازی‌ها فرض بر این است که اتصال کوتاه در ناحیه حفاظتی خط انتقال و بعد از شینه رخ می دهد. شاخص انتخابی جهت بررسی پایداری، زمان بحرانی رفع خطا یا CCT[1] است. CCT حداکثر زمانی است که کلید می تواند عمل کند تا سیستم در حالت پایدار بماند. برای نشان دادن تاثیر دینامیک بار روی پایداری سیستم، بار A با درصدهای متفاوت استاتیکی و

[1]Critical Clearing Time

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.3.2]

دینامیکی در نظر گرفته می‌شود. در حالت دینامیکی بودن بار، پارامتر T_p نیز تغییر می‌یابد.

جدول(۱) مرز پایداری و ناپایداری زاویه روتور ژنراتور 3 را برای بار A به صورت استاتیکی، دینامیکی و ترکیب استاتیک-دینامیکی نشان می‌دهد. باید توجه داشت که در این شبیه سازی بارهای B و C کاملا استاتیکی در نظر گرفته شده‌اند.

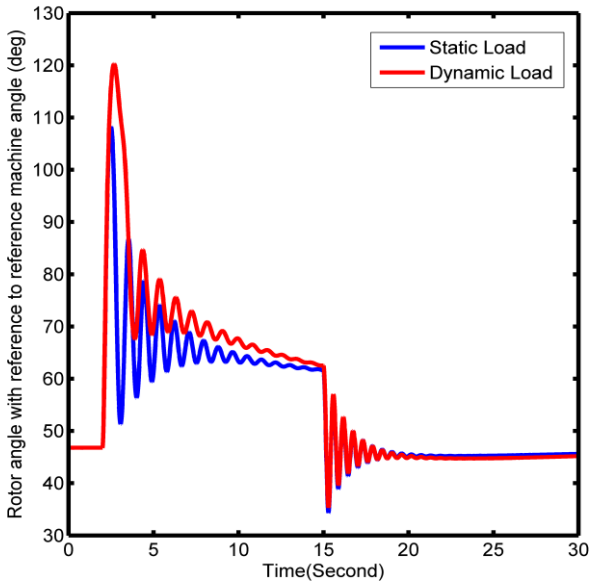
جدول ۱: CCT با توجه به درصد مدل سازی استاتیک ودینامیک بارA

LOAD A	T_p(s)	CCT
100% Static	-	2.078
70% Static 30%Dynamic	0.1	2.0774
	0.2	2.0764
	0.4	2.0747
50% Static 50%Dynamic	0.1	2.0766
	0.2	2.07491
	0.4	2.071
30% Static 70%Dynamic	0.1	2.0759
	0.2	2.0734
	0.4	2.0692
100%Dynamic	0.1	2.0748
	0.2	2.0711
	0.4	2.0646

از جدول (۱) استنتاج می شودکه:

- در نظر گرفتن مدل دینامیکی برای بار، مقدار CCT را کاهش می‌دهد (حدود ۱۲میلی ثانیه برای حالت استاتیکی و دینامیکی با T_p=0.4). به عبارت دیگر با افزایش دینامیک بار وضعیت سیستم از لحاظ پایداری بدتر می‌شود. لذا استاتیک مدل کردن بارها در شبیه‌سازی‌ها تقریبی خوش‌بینانه خواهد بود.
- با افزایش *Tp* مقدار CCT کاهش می‌یابد. همانطور که گفته شد هر چه *Tp* افزایش یابد پاسخ بار دیرتر به نقطه نهایی خود می‌رسد. یعنی در هنگام برگشت ولتاژ، بار هنوز به مقدار قبلی خود بازنگشته است. این امر از دید سیستم که پس از رخداد، انتظار همان مقدار بار قبلی را داشته است عامل نامتعادلی شده و در نتیجه سیستم را ناپایدارتر می‌سازد.

شکل(۴) تغییرات زاویه بار ژنراتور۳ را در شرایط مشابه و در دو حالت استاتیک و دینامیک فرض کردن بار A (با T_p=0.2) نشان می‌دهد. زمان اتصال کوتاه برابر ۲.۰۷۱۱ ثانیه فرض شده است.



شکل (۴): تغییرات زاویه بار ژنراتور ۳ نسبت به ژنراتور مرجع

۴- تخمین پارامتر های مدل بار با فیلتر کالمن

در بخش قبل مشاهده شد که مدلسازی دینامیکی بار می‌تواند بر نتایج پایداری شبکه تاثیرگذار باشد. بنابراین باید در مطالعات پایداری بارها به شکل دینامیک مدل شوند. برای این کار نیاز به پارامترهای مدل بار انتخابی خواهیم داشت که می بایستی تخمین زده شوند. برای این کار می‌توان از داده‌های موجود که در دستگاههای اندازه‌گیری مانند PMUها ثبت شده‌اند بهره برد. روش کار به "بازخوانی رخداد" مشهور است. در این روش ابتدا داده‌های اندازه‌گیری شده در یک شینه (مانند ولتاژ، فرکانس، یا زاویه ولتاژ) به همان شینه اصلاحا تزریق شده و پاسخ اندازه‌گیری شده حاصل از سیستم متصل به آن شینه (مثلا توانهای اکتیو و راکتیو) برای کالیبراسیون پارامترهای مدل مفروض مورد استفاده قرار می‌گیرند. معادلات حالت گسسته یک سیستم قدرت را می‌توان در حالت کلی به شکل معادله (۸) زیر نوشت :

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.3.2]

$$X(k+1) = X(k)[A\Delta t + I] + Bu(k)\Delta t \qquad (۸)$$

که در روابط فوق X(k) متغیرهای حالت و u(k) ورودی های سیستم است.

کمیات اندازه گیری شده زیر مجموعه‌ای از متغیرهای حالت بوده یا می‌توانند با استفاده از متغیر حالت نشان داده شوند. بنابراین "بازخوانی رخداد" تزریق مقادیر اندازه گیری شده در هر گام از شبیه‌سازی‌ها است. در این حالت مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دستگاه‌های اندازه-گیری (ولتاژ و فرکانس) در شینه مورد بحث که بار به آن متصل است بازخوانی شده و به شینه تزریق می‌شوند. سپس توان‌های حاصل از مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده این توان‌ها مقایسه شده و از خطای حاصله برای تنظیم پارامترهای مدل استفاده می‌گردد. سیستم خارجی در واقع در اینجا با یک منبع ولتاژ تنظیم شونده که دامنه و فرکانس آن با مقادیر اندازه‌گیری شده مساوی هستند مدل می‌شود. در این حالت به دلیل بزرگ بودن سیستم خارجی، برهم‌کنش بین بار و سیستم خارجی تاثیر بسیار کمی روی مقادیر ولتاژ و فرکانس شینه خواهد داشت. اگر تطابق مناسبی بین پاسخ مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده برقرار نباشد، نتایج حاکی از عدم دقت و صحت پارامترهای مدل است. این خطا به خطای تخمین شهره است. حال باید از روشی استفاده نمود تا این خطا کمینه گردد.

فیلتر کالمن ابزاری قوی و پراستفاده برای دنبال کردن متغیرهای حالت سیستم‌ها و تخمین پارامترهای آنها به صورت online است. این روش سعی در کمینه کردن میانگین مربعات خطا دارد. خروجی فیلتر کالمن به شکل بازگشتی محاسبه شده و همگام‌سازی حالت‌های جدید، با استفاده از حالت قبلی و داده ورودی انجام می‌گیرد. بنابراین تنها حالت تخمین زده شده قبلی باید در حافظه نگهداری شود و بدین دلیل الگوریتم برای پیاده‌سازی دیجیتال مناسب است. فرمول‌بندی ریاضی مسأله را می‌توان با استفاده از مفاهیم فضای حالت بیان کرد. برای یافتن پارامترهای سیستم می‌توان پارامترهای تخمین زده شده را حالت‌های t مدل در نظر گرفت. البته بایستی مدل برای فیلتر کالمن شناخته شده باشد[15].

در اینجا هدف تخمین پارامترهای مدل دینامیکی بار است. برای سادگی، پارامترهای α_Sوα_t ثابت فرض شده و تنها تخمین پارامتر T_P مدنظر خواهد بود. فیلتر کالمن به سه دسته خطی، توسعه‌یافته (EKF) و بدون دنباله (UKF) تقسیم می‌شود. نظر به غیرخطی بودن مدل دینامیکی بار و همچنین مزایای فیلتر بدون دنباله، در این مقاله از این فیلتر برای تخمین پارامتر T_P استفاده خواهد شد.

معادلات فیلتر UKF

مقدار دهی اولیه این فیلتر با متوسط وکواریانس حالت پیش بینی شده رابطه (۹) صورت می گیرد.

$$\begin{cases} \hat{x}_0 = E[x_0] \\ P_{X0} = E[(x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)^T \end{cases} \qquad (۹)$$

نقاط سیگما و کواریانس حالت پیشین طبق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شوند:

$$x_{i,k-1} = \begin{cases} \hat{x}_{k-1} \ , i = 0 \\ \hat{x}_{k-1} + \gamma\left(\sqrt{P_{X_{K-1}}}\right)_i \ , i = 0,1,\ldots,L \\ \hat{x}_{k-1} + \gamma\left(\sqrt{P_{X_{K-1}}}\right)_{i-L} \ , i = L+1,\ldots,2L \end{cases} \qquad (۱۰)$$

که در آن، $\left(\sqrt{P_{X_{K-1}}}\right)_i$ به ستون iام ماتریس $\sqrt{P_{X_{K-1}}}$ اشاره دارد و $\gamma = \sqrt{L+\lambda}$ است و نقاط سیگما از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شوند.

$$x_{i,k|k-1} = f\left(x_{i,k-1}\right) \qquad (۱۱)$$

همچنین متوسط پسین $\hat{x}_k^-$ و کواریانس $P_{X_K}^-$ از نقاط سیگمای آماری طبق روابط (۱۲) و (۱۳) تعیین می‌شوند:

$$\hat{x}_k^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^m \, x_{i,k|k-1} \qquad (۱۲)$$

$$P_{X_K}^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^c \left(x_{i,k|k-1} - \hat{x}_k^-\right)\left(x_{i,k|k-1} - \hat{x}_k^-\right)^T \qquad (۱۳)$$

وزن‌های W_i^c, W_i^m نیز از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شوند:

$$\begin{cases} W_0^m = \lambda/(L+\lambda) \\ W_0^C = \left[\lambda/(L+\lambda)\right] + 1 - \alpha^2 + \beta \\ W_i^c = W_i^m = 1/2(L+\lambda) \qquad i = 1,\ldots,2L \end{cases} \qquad (۱۴)$$

در این معادله λ یک پارامتر مقیاس دهی مرکب و برابر $\lambda = \alpha^2(L+K) - L$ و l معمولا برابر با بعد ماتریس حالت در نظر گرفته می‌شود. ثابت α گستره نقاط اطراف سیگمای اطراف $\bar{X}$ را تعیین می‌کند و معمولا با یک مقدار مثبت کوچک مقداردهی می‌شود ($0 < \alpha < 10^{-4}$). همچنین β برای یکسان کردن اطلاعات قبلی توزیع X است. ثابت K یک پارامتر مقیاس‌دهی درجه دوم است که معمولا با ۰ یا $3-L$ مقداردهی می‌شود. عناصر ماتریس اندازه‌گیری تخمینی $Y_{i,k|k-1}$، نیز با نقاط سیگمای تبدیل شده با استفاده از مدل اندازه گیری غیرخطی طبق رابطه (۱۵) محاسبه می‌شوند:

$$Y_{(i,k|k-1)} = h\left(x_{i,k|k-1}\right) \qquad (۱۵)$$

متوسط اندازه‌گیری $\hat{y}_k^-$ و کواریانس اندازه‌گیری $P_{y_k y_k}$ ، بر پایهٔ نقاط سیگمای آماری تبدیل شده و از رابطه (۱۶) به دست می‌آید.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.3.2]

$$\begin{cases} \hat{y}_k^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^m \mathrm{Y}_{i,k|k-1} \\ P_{y_k y_k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^c \left(\mathrm{Y}_{i,k|k-1} - \hat{y}_k^-\right)\left(\mathrm{Y}_{i,k|k-1} - \hat{y}_k^-\right)^T + R \end{cases} \quad (۱۶)$$

کواریانس همبستگی متقابل $P_{x_k y_k}$ به فرم معادله (۱۷) محاسبه می-شود:

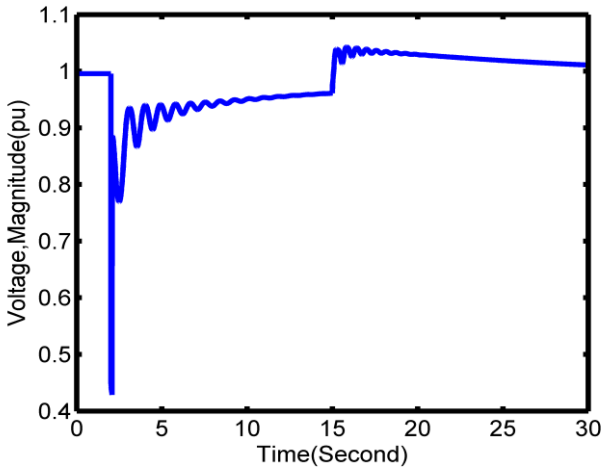
$$P_{x_k y_k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^c \left(\mathrm{x}_{i,k|k-1} - \hat{x}_k^-\right)\left(\mathrm{Y}_{i,k|k-1} - \hat{y}_k^-\right)^T + R \quad (۱۷)$$

ماتریس بهرهٔ کالمن از همبستگی متقابل و کواریانس اندازه‌گیری به فرم معادله (۱۸)، تقریب زده می‌شود:

$$K_k = P_{x_k y_k} \; P_{y_k y_k}^{-1} \quad (۱۸)$$

٤-١- تخمین پارامتر T_p

در این قسمت با تزریق تغییرات ولتاژ و فرکانس به شینه‌ای که بار A به آن متصل است (شینه ۹) مقدار T_P با ثابت در نظر گرفتن α_s=0.38 و α_t=۲.۲۶ تخمین زده می‌شود. شکل(۵) ولتاژ این شینه را در سیستم سه ماشینه و در اثر وقوع رخداد بخش ۳ نشان می‌دهد. در این حالت مقدار T_p برابر ۱/۲ فرض شده است. خروجی‌های نرم‌افزار Digsilent را از آنجایی که به مقادیر واقعی دسترسی نداشته‌ایم، به عنوان مقادیر اندازه‌گیری برای تخمین به فیلتر کالمن اعمال کرده‌ایم. ولتاژ و فرکانس شینه ۹ در هر گام اعمال می‌گردد. UKF به صورت یک فرآیند تصحیح- پیش‌بینی دو مرحله‌ای فرموله‌بندی می‌شود. مرحله پیش‌بینی یک بهنگام سازی زمانی با استفاده از معادلات حالت است که مقادیر حالت و اندازه‌گیری در گام بعد را بر اساس مقادیر گام قبل تخمین می‌زند. علاوه بر پیش‌بینی مقادیر حالت سیستم، یک ماتریس کوواریانس خطا نیز در همان گام محاسبه می‌شود. تصحیح، گین کالمن K_k برای بدست آوردن مقادیر حالت تصحیح و کمینه کردن عدم تطابق بین کمیات اندازه‌گیری شده تخ مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده به‌کار گرفته می‌شود.



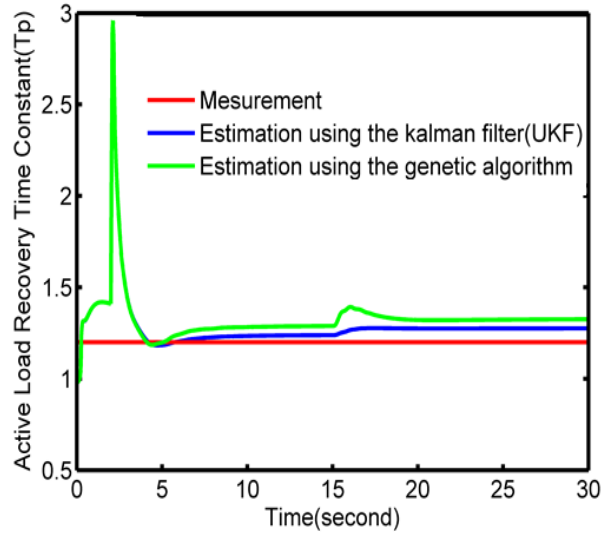
شکل(۵): تغییرات ولتاژ باس شماره ۹ سیستم سه ماشینه

معادله (۱۹) مدل دینامیکی بار را به شکل معادلات حالت بیان می‌کند.

$$\begin{cases} \frac{dP_r}{dt} = \frac{1}{T_p}\left(P_0\left(\frac{V}{V_0}\right)^{\alpha_s} - P_0\left(\frac{V}{V_0}\right)^{\alpha_t} - P_r\right) \\ \frac{dT_p}{dt} = 0 \end{cases} \quad (۱۹)$$

شکل (۶) نتایج را برای تخمین اولیه T_p برابر با ۰/۹۸ نشان می‌دهد. منحنی سبز و آبی رنگ نشان دهنده تخمین پارامتر T_P توسط الگوریتم ژنتیک و کالمن فیلتر است.

همانطور که مشاهده می شود روش فیلتر کالمن دقت بالاتری نسبت به الگوریتم ژنتیک دارد. ضمن اینکه روش فیلتر کالمن توانایی کار به روش Recursive و بهنگام را دارد.

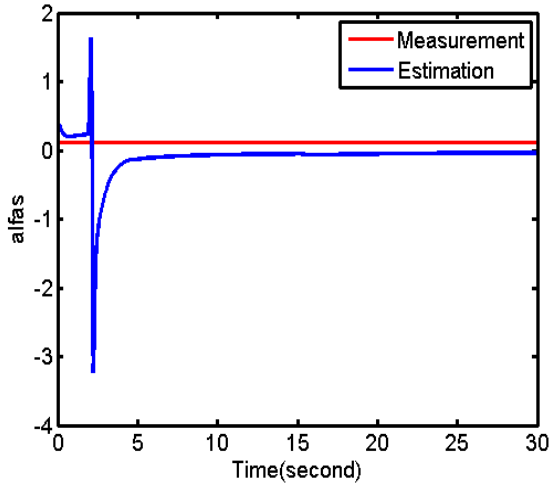


شکل(۶): تخمین پارامتر T_P

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.3.2]

برای اینکه نشان دهیم فیلتر کالمن دقت بالایی دارد با افزودن یک معادله به رابطه (۱۹) پارامتر α_s را نیز به عنوان متغیر حالت در نظر گرفته و با فیلتر کالمن تخمین زده می شود.

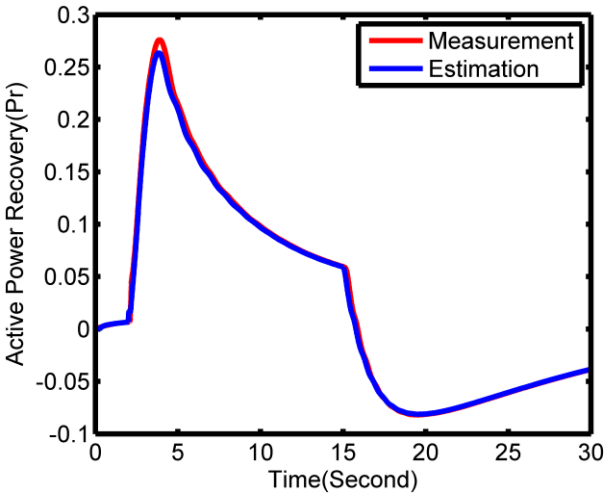
شکل(۷) نتایج را برای تخمین اولیه α_s =۰.۴۵ نشان می دهد.



شکل(۷): تخمین پارامتر α_s

۵- تاثیر نویز بر رفتار فیلتر کالمن

نکته حیاتی در عملکرد صحیح فیلتر کالمن، آگاهی دقیق از مقادیر ماتریس های کوواریانس نویز فرآیند و اندازه‌گیری است. که معمولاً تعیین این ماتریس ها به صورت دقیق امکان پذیر نیست. شکل(۸) پاسخ بارشبیه سازی‌شده و اندازه گیری‌شده را با اعمال نویز rand(1,3014) به ورودی ولتاژ (شکل۵) نشان می‌دهد.



شکل(۸): پاسخ بار شبیه سازی شده واندازه گیری شده تحت تاثیر نویز

با این تخمین پاسخ بار شبیه سازی شده واندازه گیری شده روی هم منطبق می شوند، که این نشان دهنده شبیه سازی درست و دقیق می‌باشد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله نشان داده شد که مدل بار به طور قابل ملاحظه ای بر روی پایداری گذرای سیستم تاثیر گذار است. به این معنی که نتایج مدل سازی استاتیک و دینامیک بار متفاوت از یکدیگر هستند و با افزایش دینامیک بار وضعیت سیستم از لحاظ پایداری بدتر می شود. لذا داشتن مدلی مناسب برای بار با پارامترهای دقیق الزامی است. با استفاده از فیلتر کالمن بدون دنباله روشی ارائه شد که از تزریق ولتاژ و فرکانس ایجاد شده بعد از وقوع یک اغتشاش پارامتر مهم مدل دینامیکی بار یعنی T_p تخمین زده شد. نتایج شبیه سازی حاکی از دقت بالای روش است.

۷- مراجع

[1] *Knyazkin, V., Cañizares, C. and Söder, L., On the parameterestimation and modeling of aggregate power system loads. IEEETransactions on Power Systems, 19 (2), pp. 1023-1031, 2004. DOI: 10.1109/TPWRS.2003.821634*

[2] *Panigrahi, B.K., Ravikumar-Pandi, V. and Das, S., Adaptive particle swarm optimization approach for static and dynamic economic load dispatch. Energy Conversion and Management, 49 (6), pp. 1407-1415, 2008. DOI: 10.1016/j.enconman.2007.12.023*

[3] *Hiskens, I.A., Nonlinear dynamic model evaluation from disturbancemeasurements, IEEE Transactions on Power Systems, 16 (4), pp. 702-710, 2001. DOI: 10.1109/59.962416*

[4] *Del Valle, Y., Venayagamoorthy, G.K., Mohagheghi, S., Hernandez,J.C. and Harley, R.G., Particle swarm optimization: Basic concepts,variants and applications in power systems. IEEE Transactions onEvolutionary Computation, 12 (2), pp. 171-195, 2008. DOI:10.1109/TEVC.2007.896686*

[5] *Xavier Ho, Martin Tomitsch, and TomaszBednarz.Finding designinfluence within rogue like games.Meaningful Play 2016 Conference Proceedings,2016*

[6] *Kieran Milan, Joel Veness, James Kirk-patrick, Michael Bowling, Anna Koop, and Demis Hass-abis. The forget-me-not process. In Advances in Neural Information Processing Systems, 2016*

[7] *Rodriguez-Garcia, L., Perez-Londono, S. and Mora-Florez, J., Amethodology for composite load modeling in power systemsconsidering distributed*

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.3.2]

generation, Proceedings of IEEE/PESTransmission and Distribution: Latin America Conference andExposition (T&D-LA), pp. 1-6, 2012. DOI: 10.1109/tdcla.2012.6319122

[8] A. M. Najafabadi, A.T. Alouani, "Real Time Estimation of Sensitive Parameters of Composite Power System Load Model" IEEE PES Transmission & Distribution, Orlando, May2012

[9] R. He, J. Ma, and D. J. Hill, "Composite load modeling via measurement approach," IEEE Trans. Power Syst., vol. 21, no. 2, pp.663–672,May 2006

[10] L. Rodriguez-Garcia, S. Perez-Londono, J. Mora-Florez, "A methodology for composite load modeling in power systems considering distributed generation," 2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA), pp. 1-7, 3-5 Sept. 2012

[11] McIntyre, S.R., Roberts, L.J.: 'Tasmanian power system load modeling: static and dynamic techniques & comparisons', EECON TAS, April 2011

[12] M. F. Huber, "Chebyshev polynomial Kalman filter," Digital Signal Processing, vol. 23, no. 5, pp. 1620–1629, 2013.

[13] SwaroopKumar.Nallagalva,Mukesh Kumar Kirar, Dr.Ganga Agnihotri' Transient Stability Analysis of the IEEE 9-Bus ElectricPowerSystem' ISSN : 2277-1581, 01 July 2012

[14] Uchhrang K. Jethwa, Member, IEEE, Rajeev Kumar Bansal, Ninad Date, and Ranjeet Vaishnav, "Comprehensive Load-Shedding System", IEEE Transactions On Industry Applications, Vol.46,No. 2, March/April 2010

[15] Mohammed, M., Bellar, A., Adnane, A., Boussadia, H., 2016. Performance analysis of attitude determination and estimation algorithms applied to low earth orbit satellites. Ukacc, International Conference on Control (pp.1-6). IEEE.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.3.2]