

تخمین گر جدید حالت در سیستم‌های توزیع

سعید سبزه‌بین و فرید کربلایی

به دست آمده نیز دقیق نخواهد بود و بنابراین باید بتوان بهترین تخمین از حالت سیستم را با استفاده از اندازه‌گیری‌های موجود به دست آورد. ورودی‌های تخمین حالت، اندازه‌گیری‌ها و اطلاعات مربوط به حالت سوییچ‌ها و بارهای پیش‌بینی شده و خروجی‌های آن، ولتاژ شین‌های شبکه می‌باشند. یکی از روش‌های رایج در تخمین حالت، روش حداقل مربعات وزن‌دار^۱ است که در این روش به طور معمول اندازه و زاویه ولتاژ شین‌ها به عنوان متغیرهای حالت شبکه در نظر گرفته می‌شود [۲] و [۳]. در بعضی از مراجع نیز جریان خطوط را به عنوان متغیرهای حالت برای شبکه انتخاب می‌کنند و بنابراین متغیرهای اندازه‌گیری بر حسب اندازه و زاویه جریان شاخه‌ها نوشته می‌شوند. از آنجایی که اندازه‌گیری‌های مختلفی در سیستم‌ها وجود دارد، لذا بسته به نوع اندازه‌گیری‌های سیستم این روش می‌تواند از حجم محاسباتی کمتر و سرعت بیشتری برخوردار باشد [۴] و [۵].

روش‌های دیگری نیز برای تخمین حالت در سیستم‌های توزیع ارائه شده که یکی از آنها استفاده از شبکه‌های عصبی است. شبکه‌های عصبی با استفاده از یک دسته اطلاعات ورودی و خروجی تخمین حالت، حالت شبکه را تخمین می‌زنند. ورودی‌های شبکه عصبی اندازه‌گیری‌های سیستم و خروجی‌های آن اندازه و زاویه ولتاژ شین‌های شبکه هستند که این اطلاعات از پخش بار سیستم به دست می‌آید. هرچه محدوده گسترده‌ای از ورودی‌ها و خروجی‌های مناسب در شبکه عصبی تولید شود و شبکه به خوبی آموزش ببیند، دقت آن در تخمین ولتاژ شبکه بیشتر می‌شود [۶] و [۷].

همچنین تخمین حالت با استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری به کار رفته در سیستم‌های توزیع نظیر اندازه‌گیری‌های زیرساخته پیشرفته^۲ صورت می‌گیرد. این تجهیزات اطلاعات اندازه‌گیری از قبیل توان مصرفی را به صورت زمان واقعی به مرکز کنترل می‌فرستد لذا استفاده از این تجهیزات در دقت تخمین حالت و همچنین مدیریت مصرف انرژی بسیار مفید است [۸]. تجهیزات واحدهای اندازه‌گیری فازوری^۳ که با تکنولوژی ماهواره در ارتباط است نیز برای تخمین حالت به کار می‌رود. این تجهیزات در شین‌ها نصب می‌شوند و با استفاده از تکنولوژی ماهواره به طور هم‌زمان اندازه ولتاژ چند نقطه را در یک زمان اندازه‌گیری می‌کنند. از آنجایی که تکنولوژی ماهواره گران است لذا این تجهیزات نسبت به دیگر دستگاه‌های اندازه‌گیری از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیستند [۹].

در این مقاله یک تخمین گر جدید بر مبنای پخش بار پیشرو-پسرو^۴ پیشنهاد شده که با استفاده از بارهای مصرفی شبکه و اندازه‌گیری ولتاژ در شین مرجع حالت شبکه را تخمین می‌زند. در ادامه روش حداقل مربعات وزن‌دار بیان می‌شود و پس از آن روابط و روندنمای تخمین گر جدید ارائه می‌گردد. سپس هر دو تخمین گر بر روی

چکیده: به دلیل کمبود اندازه‌گیری در سیستم‌های توزیع، تخمین حالت در این سیستم‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روش‌های مختلفی برای تخمین حالت در سیستم‌های توزیع ارائه شده است تا دقت حالت شبکه را با این اندازه‌گیری‌های محدود بهبود بخشند. در این مقاله، یک تخمین گر جدید حالت در سیستم‌های توزیع ارائه شده که این تخمین گر بر مبنای پخش بار پیشرو-پسرو است که در هر مرحله با تنظیم بارهای مصرفی، حالت شبکه را تخمین می‌زند. ورودی‌های این تخمین گر اندازه‌گیری ولتاژ در شین مرجع، بارهای مصرفی در شین‌های بار و اندازه‌گیری‌های تزریق صفر در شین‌های بدون بار می‌باشند. این تخمین گر با تخمین گر حداقل مربعات وزن‌دار مقایسه و نتایج آن نشان داده شده است. همچنین در محاسبه اندازه ولتاژ شین‌ها دارای خطای کمتر و سرعت بیشتری نسبت به تخمین گر حداقل مربعات وزن‌دار می‌باشد. شبکه مورد آزمایش در این مقاله، شبکه ۸۵ شینه توزیع است.

کلیدواژه: پخش بار پیشرو-پسرو، تخمین حالت، تخمین گر حداقل مربعات وزن‌دار، مکان‌یابی تجهیزات اندازه‌گیری، سیستم‌های توزیع.

۱- مقدمه

امروزه تخمین حالت به یک ابزار مهم در اتوماسیون و مدیریت سیستم‌های قدرت تبدیل شده است. تخمین حالت، وضعیت شبکه را به صورت لحظه‌ای با استفاده از اطلاعات و اندازه‌گیری‌های مختلف تخمین می‌زند و از آن در محاسبات مختلف از قبیل تلفات، بهینه‌سازی ولتاژ و توان راکتیو استفاده می‌شود.

تخمین حالت در سیستم‌های توزیع با چالش‌هایی نسبت به سیستم انتقال روبه‌رو است که این چالش‌ها شامل نسبت زیاد مقاومت به راکتانس خط، نامتعادلی، شعاعی بودن و کمبود تجهیزات در سیستم‌های توزیع است. شبکه‌های توزیع دارای شین‌های زیادی هستند که در همه این شین‌ها تجهیز اندازه‌گیری وجود ندارد، زیرا از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست تا در همه شین‌های شبکه تجهیز اندازه‌گیری نصب کرد. به دلیل کمبود تجهیزات اندازه‌گیری در سیستم‌های توزیع و همچنین وجود خطا و نویز در مقادیر اندازه‌گیری، از تخمین حالت استفاده می‌شود. سیستم‌های توزیع در مقایسه با سیستم‌های انتقال تجهیزات اندازه‌گیری کمتری دارند و به همین دلیل تخمین حالت در این سیستم‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱].

به طور معمول در اندازه‌گیری‌ها خطا و نویز وجود دارد، لذا عمل تخمین حالت سیستم بر اساس روش‌های آماری صورت می‌پذیرد که با حداکثر یا حداقل کردن معیاری ویژه، مقادیر واقعی متغیرهای حالت تخمین زده می‌شوند. از آنجایی که اندازه‌گیری‌ها دقیق نیستند، تخمین

این مقاله در تاریخ ۴ بهمن ماه ۱۳۹۴ دریافت و در تاریخ ۲۰ شهریور ماه ۱۳۹۶ بازنگری شد.

سعید سبزه‌بین، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، (email: saeed_sabzebin@yahoo.com)

فرید کربلایی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، (email: f_karbalaee@sru.ac.ir)

1. Weighted Least Squares
2. Advance Meter Infrastructure
3. Phasor Measurements
4. Forward-Backward Load Flow

۳- الگوریتم تخمین گر جدید

از آنجایی که شبکه‌های توزیع در مقایسه با شبکه‌های انتقال دارای ساختار و ویژگی‌های متفاوتی هستند، لذا روش‌های به کار رفته در شبکه‌های انتقال برای شبکه‌های توزیع تا حدودی نامناسب می‌باشند، لذا از روش‌هایی استفاده می‌شود که همخوانی و هماهنگی نزدیک‌تری با ساختار شبکه‌های توزیع داشته باشد. الگوریتم پیشنهادی برای شبکه‌های توزیع که دارای ساختار شعاعی و حلقه‌ای با تعداد گره‌های زیاد و اندازه‌گیری‌های محدود هستند، مناسب می‌باشند. این تخمین‌گر بر مبنای روش پیشرو- پسر و در پخش بار شعاعی است که با استفاده از اندازه‌گیری‌های ولتاژ و مقادیر بار، حالت شبکه (اندازه و زاویه ولتاژ شین‌ها) را تخمین می‌زند. این تخمین‌گر بسته به نوع سیستم و اندازه‌گیری‌های به کار رفته در آن می‌تواند نتایج بهتری ارائه نماید. مراحل اجرای الگوریتم به صورت زیر است:

گام اول: ورودی‌های پخش بار در شبکه‌های توزیع، بارهای مصرفی شین‌ها و اطلاعات خطوط می‌باشند. ابتدا با فرض این که ولتاژ تمامی شین‌ها یک پریونیت با زاویه صفر است، جریان شین‌ها از رابطه زیر محاسبه می‌گردند

$$I_i = \left(\frac{S_i}{V_i}\right)^* \quad , \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

که S_i توان ظاهری شین‌های بار، I_i جریان شین‌ها و V_i ولتاژ شین‌های سیستم می‌باشد.

گام دوم: با به دست آوردن جریان شین‌ها، جریان شاخه‌ها محاسبه می‌شود (J_{ij}).

گام سوم: پس از محاسبه جریان شاخه‌ها، ولتاژ شین‌ها (V_{cal}) از رابطه زیر به دست می‌آید

$$V_j = V_i - (Z_{ij} J_{ij}) \quad (6)$$

که V_j ولتاژ شین پایین دست، V_i ولتاژ شین بالادست، Z_{ij} و J_{ij} نیز به ترتیب امپدانس و جریان بین شین‌های ij هستند. با فرض این که ولتاژ شین مرجع برابر یک پریونیت است، ولتاژ شین‌های متصل به شین مرجع از رابطه بالا به صورت پله‌ای محاسبه می‌شود و به همین ترتیب ولتاژ شین‌های دیگر نیز تعیین می‌گردند.

گام چهارم: با استفاده از اندازه‌گیری‌های ولتاژ (V_{meas}) که همان اطلاعات ورودی هستند، مجموع اختلاف بین ولتاژهای محاسبه‌ای (V_{cal}) و اندازه‌گیری طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$\Delta V = \sum_{i=1}^N (V_{cal}(i) - V_{meas}(i)) \quad (7)$$

که N تعداد اندازه‌گیری‌های ولتاژ و ΔV مجموع اختلاف بین ولتاژهای محاسبه‌ای و اندازه‌گیری می‌باشد.

گام پنجم: با استفاده از جریان شین‌ها و اختلاف ولتاژهای به دست آمده از (۷)، توان‌های بار تنظیم می‌گردند. این تنظیم توان از رابطه زیر انجام می‌شود

$$S_{new}(i) = S(i) + I(i)\Delta V \quad (8)$$

پس از به دست آوردن توان‌های تنظیم‌شده بار S_{new} گام‌های ۱ تا ۵ دوباره تکرار می‌گردند. این روند تا جایی ادامه دارد که ΔV از حد مشخص‌شده‌ای کمتر شود یا به یک تعداد مشخص‌شده‌ای از تکرارها رسیده باشد. حد مشخص‌شده برای ΔV بر اساس دقت اندازه‌گیری‌های

شبکه ۸۵ شینه سیستم توزیع اجرا گردیده و نتایج هر دو تخمین‌گر حالت با هم مقایسه می‌شوند. در انتها هم نتیجه‌گیری مربوط به این تخمین‌گر آورده شده است.

۲- تخمین گر حداقل مربعات وزن دار

تخمین‌گر حداقل مربعات وزن دار یکی از روش‌های رایج در تخمین حالت شبکه‌های انتقال می‌باشد و البته در شبکه‌های توزیع نیز به کار می‌رود. این روش با حداقل کردن مربعات خطای بین مقدار واقعی و مقدار تخمینی سعی در حل مسئله دارد. تخمین حالت یک مسئله بهینه‌سازی می‌باشد که با مینیمم کردن یک تابع هدف غیر خطی با مجموعه قیود نامساوی، سعی در تخمین متغیرهای حالت شبکه دارد. معادله حاکم بر اندازه‌گیری‌ها به صورت زیر است

$$z = h(x) + e \quad (1)$$

که x بردار متغیرهای حالت، z بردار اندازه‌گیری‌ها و $h(x)$ بردارهایی هستند که رابطه بین متغیرهای حالت و اندازه‌گیری را بیان می‌کنند. در این رابطه e یک توزیع گوسین با میانگین صفر و ماتریس کواریانس $R_z = \text{diag}\{\sigma_{z_1}^2, \sigma_{z_2}^2, \dots, \sigma_{z_m}^2\}$ فرض شده و بنابراین $\sigma_{z_i}^2$ کواریانس اندازه‌گیری i ام می‌باشد.

در تخمین حالت به روش حداقل مربعات وزن دار، هدف پیدا کردن متغیرهای حالتی است که مقادیر به دست آمده از تخمین‌گر تا حد امکان به مقادیر واقعی اندازه‌گیری نزدیک باشد یعنی

$$\min_x j(x) = [Zh(x)]^T R_z^{-1} [Zh(x)] \quad (2)$$

بردار $h(x)$ در واقع همان معادلات پخش بار و قیود مسئله بهینه‌سازی هستند که در داخل تابع هدف نهفته می‌باشند. همچنین ماتریس وزن اندازه‌گیری‌ها $W = R_z^{-1}$ است.

برای حل (۲) با مشتق گرفتن و قرار دادن آن برابر صفر، یک معادله غیر خطی به دست می‌آید

$$\frac{\partial j(x)}{\partial x} \Big|_{\hat{x}} = 0 \rightarrow H^T(\hat{x})w[Z - h(\hat{x})] = 0 \quad (3)$$

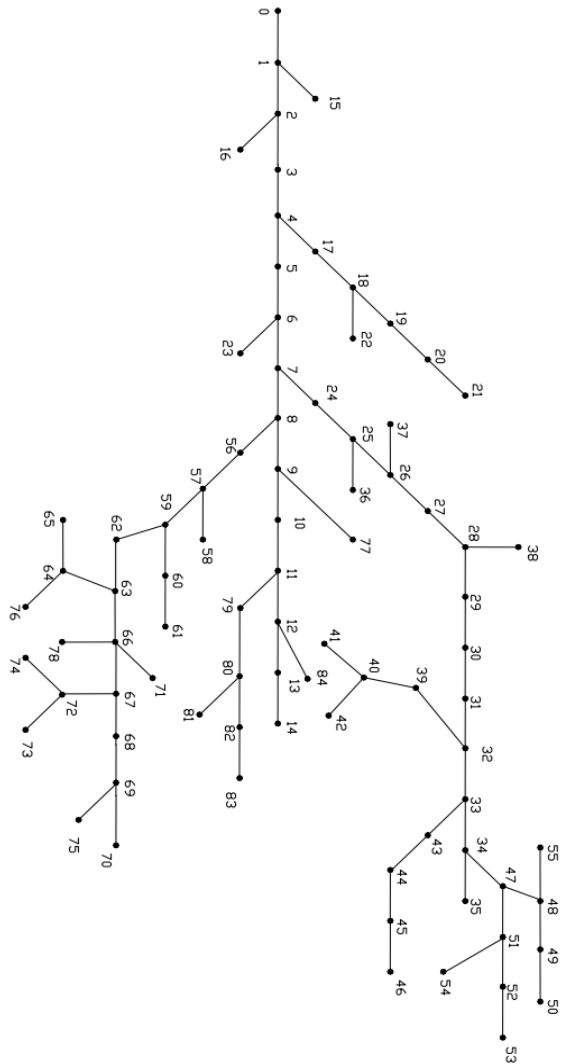
که $H(x) = \partial h(x) / \partial x$ ماتریس ژاکوبین و w ماتریس وزن‌های مربوط به اندازه‌گیری‌ها است که همان معکوس ماتریس کواریانس می‌باشد. برای حل این معادله غیر خطی از روش تکراری نیوتن-رافسون استفاده شده است. در این روش مقادیر متغیرهای حالت در هر تکرار اصلاح شده و برای تکرار در مرحله بعد استفاده می‌شود. مقادیر متغیرهای حالت اصلاح‌شده در هر تکرار به صورت زیر به دست می‌آیند

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k \quad (4)$$

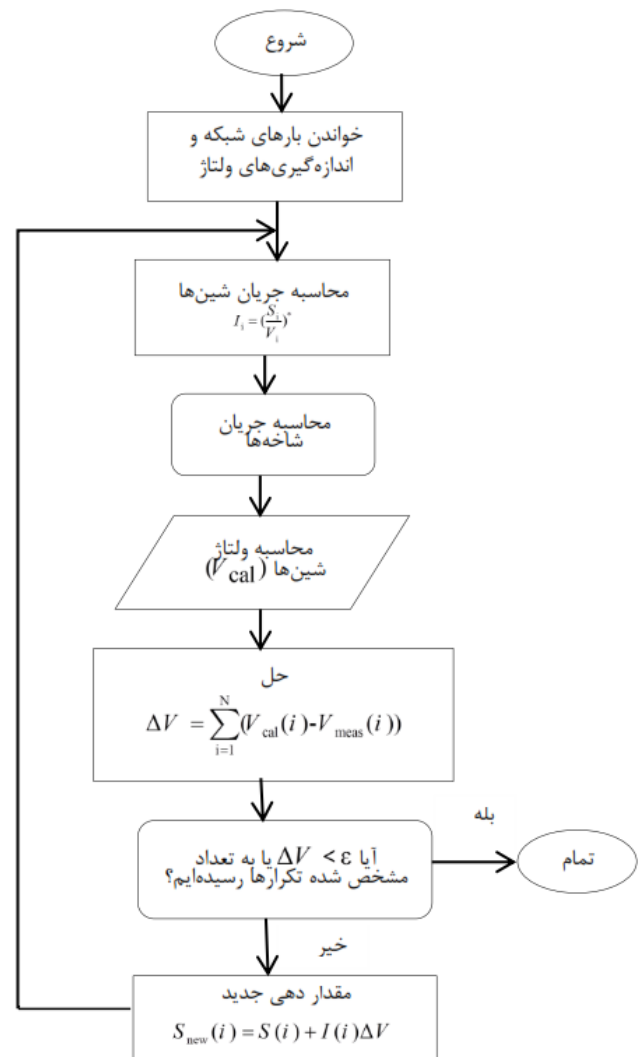
$$\Delta x = (G(x))^{-1} H^T(x) R_z^{-1} [z - h(x)]$$

$$G(x) = H^T(x) w H(x)$$

که در آن $G(x)$ ماتریس بهره نامیده می‌شود. این روش یک حل عددی برای معادلات غیر خطی می‌باشد که با استفاده از شرایط اولیه مسئله را حل می‌کند. این الگوریتم تا جایی ادامه پیدا می‌کند که Δx از مقدار تعیین‌شده کوچکی کمتر شود. بدین ترتیب با اطلاعات اولیه که همان اندازه‌گیری‌های موجود در شبکه است می‌توان حالت شبکه (ولتاژ شین‌ها) را تخمین زد. این روش یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای تخمین حالت در شبکه‌های انتقال است. در ادامه روش تخمین حالت جدید بیان می‌گردد.



شکل ۲: دیاگرام تک خطی شبکه ۸۵ شینه [۱۰].



شکل ۱: روندنمای تخمین گر جدید.

از نرم‌افزار Matlab برای شبیه‌سازی استفاده شده است. همان طور که گفته شد، تجهیزات اندازه‌گیری با خطا همراه هستند و به همین دلیل برای شبیه‌سازی مقادیر ورودی برنامه که همان اندازه‌گیری‌های موجود در شبکه هستند، آنها را با خطا در نظر می‌گیریم. خطای در نظر گرفته شده برای اندازه‌گیری‌های کاذب ۵۰٪ و برای اندازه‌گیری‌های واقعی ۳٪ فرض شده است. همچنین واریانس اندازه‌گیری‌های تزریق صفر 10^{-8} می‌باشد [۱۱]. انحراف معیار مقادیر اندازه‌گیری از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۲]

$$\sigma_{zi} = \frac{\mu_{zi} \times \%error}{3 \times 100} \quad (9)$$

در این رابطه $\%error$ حداکثر خطای در نظر گرفته شده بر حسب درصد می‌باشد. σ_{zi} و μ_{zi} به ترتیب مقدار میانگین و انحراف معیار متغیر z_i (اندازه‌گیری‌ها) هستند. برای ارزیابی بهتر و جامع‌تر، از نمونه‌گیری‌های تصادفی در اندازه‌گیری‌ها استفاده می‌شود و برای این کار روش مونت کارلو^۳ به کار می‌رود.

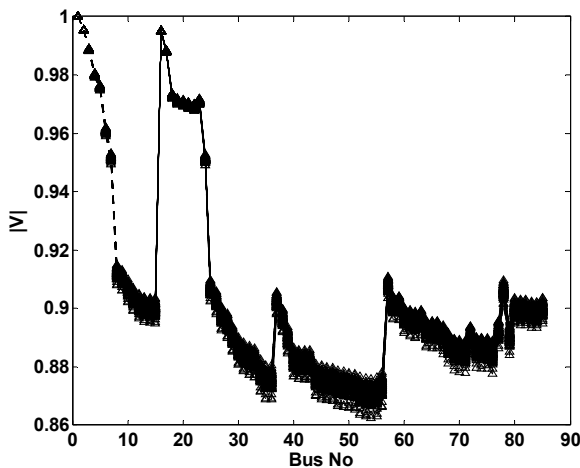
مونت کارلو یک الگوریتم محاسباتی است که از نمونه‌گیری تصادفی برای محاسبه نتایج استفاده می‌کند، لذا برای شبیه‌سازی و اعمال نامعینی‌ها به کار می‌رود. این نامعینی‌ها همان اندازه‌گیری‌های موجود در شبکه هستند که با خطا همراهند. از آنجایی که نمی‌توان بر اساس یک بار

ولتاژ تعیین می‌شود. در اینجا ممکن است در بعضی از شین‌های شبکه هم تجهیز اندازه‌گیری ولتاژ و هم اندازه‌گیری توان وجود داشته باشد. روندنمای الگوریتم در شکل ۱ نشان داده شده است.

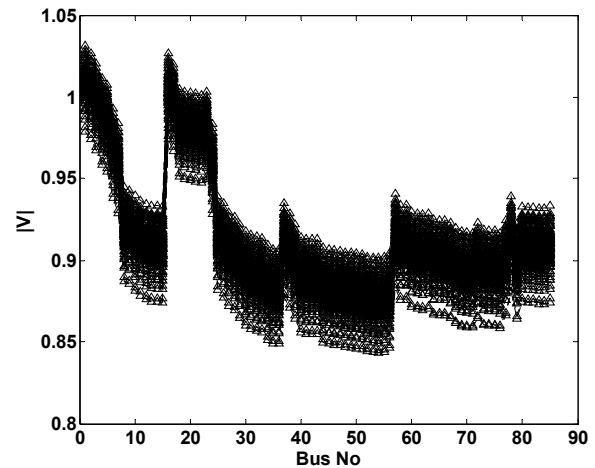
۴- مراحل انجام شبیه‌سازی بر روی شبکه نمونه

هر دو الگوریتم بر روی شبکه توزیع ۸۵ شینه شبیه‌سازی شده [۱۰] و شکل ۲ دیاگرام تک‌خطی این شبکه را نشان می‌دهد. ولتاژ و توان ظاهری مبنا در این شبکه به ترتیب ۱۱ کیلوولت و ۱۰۰ مگاوات آمپر در نظر گرفته شده است. اندازه‌گیری‌های ثابت در این شبکه شامل اندازه‌گیری‌های تزریق صفر^۱ در شین‌های بدون بار، اندازه‌گیری‌های کاذب^۲ در شین‌های بار و اندازه‌گیری‌های ولتاژ و توان تزریقی در شین مرجع می‌باشند. اندازه‌گیری‌های تزریق صفر مربوط به شین‌هایی هستند که نه تولیدکننده و نه مصرف‌کننده هستند و از آنجایی که بار و تولیدی وجود ندارد، خطای پیش‌بینی وجود نخواهد داشت. اندازه‌گیری‌های کاذب نیز همان اطلاعات مربوط به پیش‌بینی بار مصرفی در شین‌های بار هستند که با خطای زیادی همراهند. اندازه‌گیری‌های به کار رفته در این شبکه شامل ۵۹ شین دارای اندازه‌گیری بار مصرفی، ۲۶ شین بدون بار و یک اندازه‌گیری ولتاژ در شین مرجع می‌باشند.

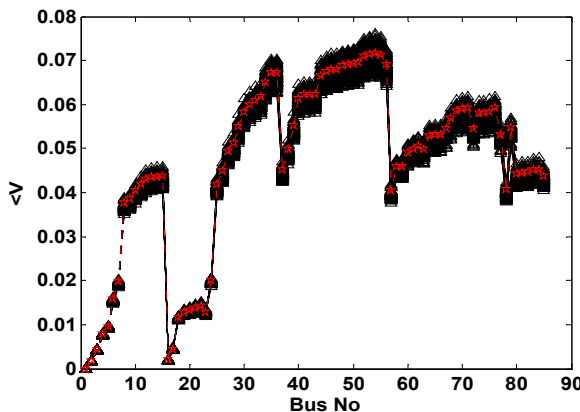
1. Zero Injection Measurements
2. Pseudo Measurement



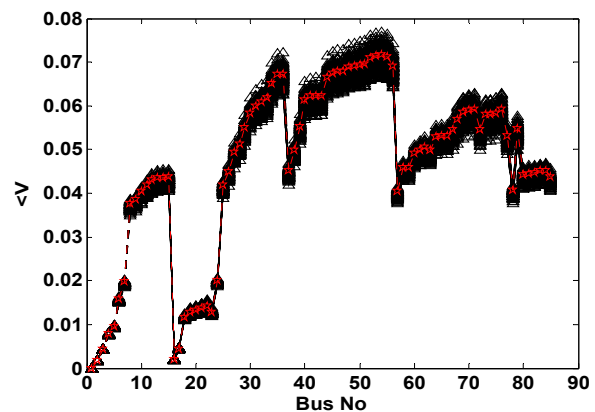
شکل ۴: مقادیر تخمینی اندازه ولتاژ شین‌ها توسط تخمین‌گر جدید.



شکل ۳: مقادیر تخمینی اندازه ولتاژ شین‌ها توسط روش حداقل مربعات وزن‌دار.



شکل ۶: مقادیر تخمینی زاویه ولتاژ شین‌ها توسط تخمین‌گر جدید.



شکل ۵: مقادیر تخمینی زاویه ولتاژ شین‌ها توسط روش حداقل مربعات وزن‌دار.

به دست آمد. از آنجایی که تفاوت چندانی در محاسبه زاویه ولتاژ شین‌ها توسط هر دو تخمین‌گر احساس نشد لذا نیازی به آوردن نتایج زاویه در ادامه احساس نمی‌شود.

برای ارزیابی دقت دو تخمین‌گر انحراف معیار تخمینی اندازه و زاویه ولتاژ شین‌ها طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$Var(\hat{V}^i) = \frac{\sum_{j=1}^{N_{mc}} (\hat{V}_j^i - \bar{V}^i)^2}{N_{mc}} \quad (10)$$

$$\bar{V}^i = \frac{\sum_{j=1}^{N_{mc}} \hat{V}_j^i}{N_{mc}}$$

که \bar{V}^i میانگین ولتاژ تخمینی شین i در مجموعه شبیه‌سازی مونت کارلو (N_{mc}) و \hat{V}_j^i مقدار ولتاژ تخمینی شین i در شبیه‌سازی j ام می‌باشد. با اجرای تخمین حالت توسط هر دو الگوریتم انحراف معیار ولتاژهای تخمینی شین‌ها به دست می‌آید.

در شکل ۷ انحراف معیار اندازه ولتاژهای تخمینی شین‌های به دست آمده از دو الگوریتم حداقل مربعات وزن‌دار و تخمین‌گر جدید آمده است. انحراف معیار اندازه ولتاژ شین‌ها در تخمین‌گر جدید کمتر از تخمین‌گر WLS به دست آمد که این خود بیان‌گر خطای کمتر و دقت در تخمین است. همچنین خطاهای نسبی ولتاژ شین‌ها از رابطه زیر به دست می‌آید

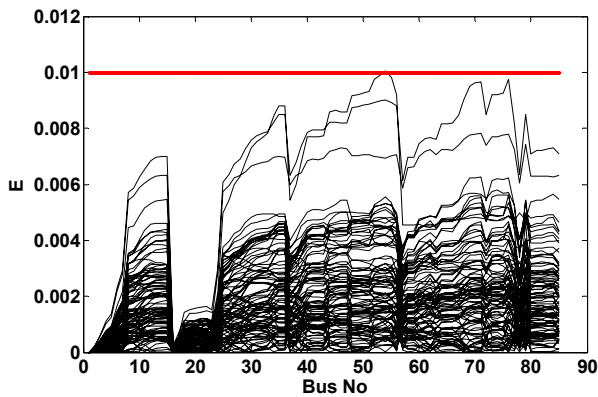
$$E_i = \left| \frac{\hat{V}_t^i - V_t^i}{V_t^i} \right| \quad (11)$$

اعمال نامعینی نتیجه‌گیری منطقی کرد بنابراین چند بار شبیه‌سازی انجام می‌شود و در هر بار یک نمونه‌گیری از نامعینی‌ها به طور تصادفی انتخاب می‌گردد. این تعداد نمونه‌گیری‌های تصادفی در مونت کارلو ۱۰۰ عدد در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب با داشتن میانگین اندازه‌گیری μ_{zi} و انحراف معیار آن σ_{zi} تعداد ۱۰۰ نمونه از این اندازه‌گیری تولید شده و برای هر کدام از این نمونه‌ها تخمین‌گر اجرا می‌شود.

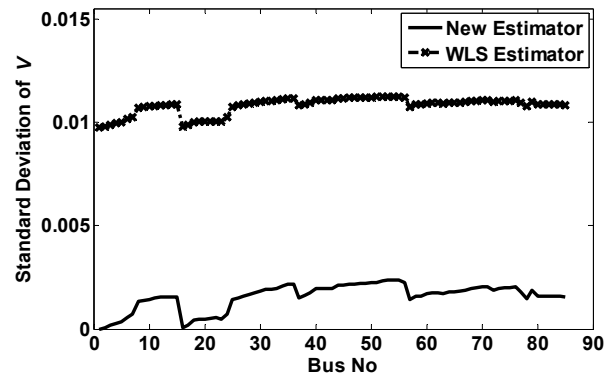
۵- نتایج شبیه‌سازی

مقادیر به کار رفته در شبیه‌سازی بر اساس پروبیت می‌باشند به طوری که ولتاژها و مقادیر مینا برابر یک پروبیت در نظر گرفته شده‌اند و بقیه مقادیر بر همین اساس پروبیت شده‌اند. شکل‌های ۳ و ۴ اندازه ولتاژ شین‌های شبکه را در سرتاسر شبیه‌سازی مونت کارلو برای الگوریتم حداقل مربعات وزن‌دار و تخمین‌گر جدید نشان می‌دهند. همچنین زاویه ولتاژ شین‌ها نیز با استفاده از هر دو روش به دست آمده است (شکل‌های ۵ و ۶).

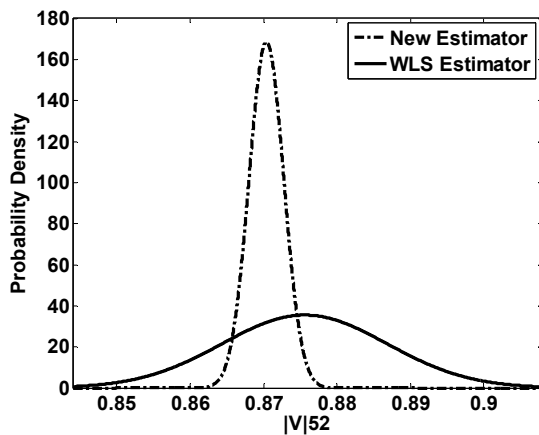
با اجرای تخمین‌گر برای ۱۰۰ نمونه مونت کارلو ۱۰۰ جواب برای اندازه ولتاژ شین‌ها به دست می‌آید. نتایج شبیه‌سازی بر اساس مقادیر پروبیت بیان شده است. همان طور که می‌بینید با اجرای شبیه‌سازی در تخمین‌گر جدید بازه تغییرات مقادیر تخمینی اندازه ولتاژ شین‌های شبکه در سرتاسر شبیه‌سازی مونت کارلو کمتر می‌باشد در صورتی که بازه این تغییرات برای تخمین‌گر حداقل مربعات وزن‌دار به نسبت بیشتر است. این نشان می‌دهد که تخمین‌گر جدید در محاسبه اندازه ولتاژ دارای خطای کمتری است. همچنین برای زاویه ولتاژ در هر دو تخمین‌گر نتایج مشابهی



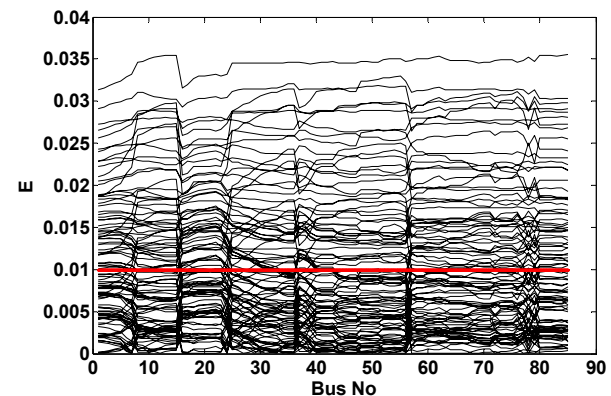
شکل ۹: خطاهای نسبی مقادیر تخمینی اندازه ولتاژ شین‌های به دست آمده توسط تخمین گر جدید.



شکل ۷: انحراف معیار اندازه ولتاژهای تخمینی شین‌ها در دو تخمین گر حداقل مربعات وزن دار و تخمین گر جدید.



شکل ۱۰: منحنی‌های چگالی احتمال شین ۵۲.



شکل ۸: خطاهای نسبی مقادیر تخمینی اندازه ولتاژ شین‌های به دست آمده توسط الگوریتم حداقل مربعات وزن دار.

هماهنگی مناسب‌تری با شبکه‌های توزیع شعاعی دارد زیرا پایه و اساس آن بر مبنای پخش بار شعاعی پیشرو-پسرو می‌باشد و به همین دلیل در شبکه‌های توزیع این الگوریتم مناسب‌تر است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک تخمین گر جدید بر مبنای روش پیشرو-پسرو در پخش بار شعاعی برای تخمین حالت شبکه‌های توزیع ارائه شد. همچنین تخمین گر حداقل مربعات وزن دار برای مقایسه با تخمین گر جدید آورده شد و نتایج هر دو تخمین گر با هم مقایسه گردید. نتایج بر روی شبکه ۸۵ شینه توزیع به دست آمد. تخمین گر جدید از لحاظ سرعت همگرایی و خطای اندازه ولتاژ نسبت به تخمین گر حداقل مربعات وزن دار بهتر است. بسته به نوع سیستم و اندازه‌گیری‌های به کار رفته در آن این تخمین گر می‌تواند نتایج بهتری نسبت به روش حداقل مربعات داشته باشد.

مراجع

- [1] N. Silva and A. Rodrigues, "Optimal measurement placement for state estimation in smart grids," in *Proc. 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe*, pp. 10-17, Oct. 2012.
- [2] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, *Power Generation, Operation, and Control*, John Wiley & Sons, 1996.
- [3] R. Ebrahimian and R. Baldick, "State estimation distributed processing," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 15, no. 4, pp. 1240-1246, Nov. 2000.
- [4] M. Baran and A. W. Kelley, "A branch-current-based state estimation method for distribution systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 483-491, Feb. 1995.
- [5] H. Li and M. Yang, "A branch-current-based state estimation for distribution systems non-measurement loads," *Power Engineering Society General Meeting*, vol. 1, no. 3, pp. 440-444, Jun. 2004.

که V_i^i و V_i^i به ترتیب اندازه ولتاژ تخمینی و واقعی و E_i خطای نسبی ولتاژ شین i می‌باشند. شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب خطاهای نسبی مقادیر تخمینی اندازه ولتاژ شین‌های به دست آمده توسط تخمین گر حداقل مربعات وزن دار و تخمین گر جدید را نشان می‌دهند.

با در نظر گرفتن معیار ۱٪ برای خطاهای نسبی اندازه ولتاژ شین‌ها همان طور که مشاهده می‌شود مقادیر به دست آمده خطاهای نسبی توسط الگوریتم جدید در تمام نمونه‌های مونت کارلو نسبت به الگوریتم حداقل مربعات وزن دار کمتر به دست آمدند که این نشان می‌دهد خطاهای مقادیر تخمینی با این الگوریتم کمتر هستند.

شکل ۱۰ نیز منحنی‌های توزیع احتمال شین ۵۲ به دست آمده توسط هر دو تخمین گر را در سرتاسر شبیه‌سازی مونت کارلو نشان می‌دهد. مقدار واقعی اندازه ولتاژ شین ۵۲ برابر ۰٫۸۷۱۵ است. همان طور که مشاهده می‌شود مقدار میانگین منحنی نرمال در تخمین گر جدید نسبت به تخمین گر حداقل مربعات وزن دار به مقدار واقعی خود نزدیک‌تر است و همچنین تغییرات منحنی پیرامون میانگین خود کمتر می‌باشد.

نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها توسط هر دو الگوریتم نشان می‌دهد، که الگوریتم تخمین گر جدید برای شبکه‌های توزیع در مقایسه با تخمین گر حداقل مربعات وزن دار بهتر می‌باشد. همچنین تخمین گر جدید نیز از لحاظ سرعت همگرایی و محاسبات سریع‌تر هستند. از آنجایی که بیشتر اندازه‌گیری‌ها را بارهای شبکه تشکیل می‌دهند، تخمین گر جدید در هر مرحله این بارها را تنظیم می‌کند و تا جایی ادامه دارد تا شرط مذکور برآورده شود. بدین ترتیب با تنظیم توان‌های بار بهترین تخمین برای ولتاژ شین‌ها به دست می‌آید. سرعت همگرایی نیز رابطه مستقیمی با تنظیم بارها دارد و در هر مرحله‌ای که بارها تنظیم می‌گردند، سرعت همگرایی به مقدار مناسب بیشتر می‌شود. همچنین مراحل محاسباتی الگوریتم جدید

- [12] R. Singh, B. C. Pal, and R. B. Vinter, "Measurement placement in distribution system state estimation," *IEEE Trans. on Power System*, vol. 24, no. 2, pp. 668-675, May 2009.
- سعید سبزه‌بین تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد برق - قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ از دانشگاه فردوسی مشهد و شهید رجایی تهران به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشجوی دکتری برق قدرت در دانشگاه بیرجند می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: تخمین حالت، سیستم‌های توزیع الکتریکی و حفاظت سیستم‌های قدرت.
- فرید کربلایی در سال ۱۳۷۵ مدرک کارشناسی مهندسی برق - قدرت خود را از دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی و در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۷ کارشناسی ارشد و دکتری را در همان رشته از دانشگاه علم و صنعت ایران دریافت کرده است. وی از سال ۱۳۸۵ تا کنون به عنوان عضو هیأت علمی در دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی مشغول به کار بوده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: دینامیک سیستم‌های قدرت، پایداری ولتاژ، کنترل و برنامه‌ریزی توان راکتیو و تخمین حالت.
- [6] C. Muscas, F. Pilo, G. Pisano, and S. Sulis, "Optimal allocation of multichannel measurement devices for distribution state estimation," *IEEE Trans. on Power System*, vol. 58, no. 6, pp. 1929-1937, Jun. 2009.
- [7] L. Ramesh, N. Chakraborty, S. P. Chowdhury, and S. Chowdhury, "Intelligent DE algorithm for measurement location and PSO for bus voltage estimation in power distribution system," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 39, no. 1, pp. 1-8, Mar. 2012.
- [8] I. Dzafic, S. Henselmeyer, and H. T. Neisius, "Real-time distribution system state estimation," in *Proc. Conf. IPEC*, pp. 22-27, Singapore, Singapore, 27-29 Oct. 2010.
- [9] K. D. Jones, *Three-Phase Linear State Estimation with Phasor Measurements*, Master of Science Thesis, Virginia Polytechnic Institute & State University, 2011.
- [10] A. Augugliaro, L. Dusonchet, and S. Mangione, "Voltage collapse proximity indicators for radial distribution networks," in *Proc. 9th Int. Conf. Electrical Power Quality and Utilisation*, 6 pp., Barcelona, Spain, 9-11 Oct. 2007.
- [11] G. N. Korres, N. D. Hatzigiorgiou, and P. J. Katsikas, "State estimation in multi-microgrids," *European Trans. on Electrical Power*, vol. 2, no. 2, pp. 1178-1199, Mar. 2010.