

ارائه یک الگوریتم جدید برای تعیین جهت خط در خطوط انتقال مبتنی بر بهینه‌سازی حداقل مربعات

صبح دانیار و الهه نوروزی

افزایشی جریان و ولتاژ عمل می‌کنند. این روش‌ها به لحاظ سرعت عملکرد وضعیت مناسبی ندارند [۳] و [۴]. برخی رله‌های جهتی از مؤلفه‌های توالی صفر و توالی منفی برای تشخیص جهت خط استفاده می‌کنند. این رله‌ها برای انواع خط‌های رخ داده در سیستم قدرت عملکرد سریع و مطمئنی ندارند [۵] و [۶]. برخی از روش‌ها جهت تشخیص صحیح خط به یک سیکل از اطلاعات جریان یا ولتاژ خط نیاز دارند که این مسئله سرعت سیستم حفاظت را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۷] و [۸].

برای کاهش زمان عملکرد رله‌های جهتی روش‌هایی بر اساس امواج سیار پیشنهاد شده است. حفاظت‌های مبتنی بر امواج سیار برای بیشتر سیستم‌ها عملکرد مناسبی خواهند داشت. اگر زاویه شروع خط نزدیک صفر باشد عملکرد این گونه روش‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرد. همچنین به علت وجود فرکانس‌های بالا در امواج سیار و محدودیت پهنای باند در ترانسفورماتورهای ولتاژ کوپل‌خازنی، کارایی این روش‌ها کاسته می‌شود. به علاوه این روش‌ها جهت داده‌پردازی به فرکانس نمونه‌برداری بالایی نیاز دارند که محدودیت سخت‌افزاری را به دنبال دارد [۹] تا [۱۲].

استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) در تشخیص جهت خط دارای سرعت و دقت نسبتاً مناسبی است. این روش‌ها می‌توانند برای انواع خط‌ها و تحت شرایط مختلف، پاسخ‌دهی مناسبی داشته باشند اما در این روش‌ها آموزش لازم و استخراج قواعد و دستورات مشخص ضروری است و از این رو دقت نتایج وابستگی زیادی به اندازه مجموعه آموزش دارد [۱۳] تا [۱۸].

در این مقاله یک روش سریع برای تعیین جهت خط ارائه شده است. از آنجایی که در همه خط‌ها مؤلفه توالی مثبت وجود دارد، طرح پیشنهادی با استفاده از مقادیر توالی مثبت استخراج شده از شکل موج خط و مقدار توان متوسط در یک نیم‌سیکل از سیگنال‌های توالی مثبت ولتاژ و جریان عمل می‌کند. این روش دارای ناحیه مرده نمی‌باشد و برای همه ده نوع خطایی که ممکن است در سیستم قدرت اتفاق بیفتد به درستی عمل می‌کند. روش پیشنهادی برای حالت‌های مختلف خط مانند خط‌های نزدیک رله، خط با مقاومت بالا و وجود منابع قوی و ضعیف عملکرد صحیحی دارد و همچنین نوسانات توان و زاویه شروع خط نیز تأثیری در عملکرد درست الگوریتم ندارد. این روش حتی در شرایط اشباع CT که کارایی خیلی از سیستم‌های حفاظتی شبکه کاهش می‌یابد نیز به درستی می‌تواند جهت خط را تشخیص دهد. علاوه بر موارد مذکور این روش دارای سرعت مناسبی بوده و در کمتر از ۱۰ میلی‌ثانیه (حدود ۷ میلی‌ثانیه) عمل می‌کند. روش پیشنهادی با استفاده از برازش منحنی مبتنی بر بهینه‌سازی حداقل مربعات، تابع حفاظت جهتی را استخراج کرده و کلیه شرایط عملکردی را لحاظ خواهد کرد. تابع به دست آمده با رویکرد ضرایب خطی و حداقل خطای محاسباتی استخراج شده و پیاده‌سازی سخت‌افزاری آن بسیار ساده می‌باشد. برای ارزیابی الگوریتم یک سیستم انتقال ۵۰۰ kV توسط نرم‌افزار EMTP-RV شبیه‌سازی شده است. داده‌های به دست آمده از این

چکیده: با توجه به کاربرد وسیع حفاظت جهتی در شبکه‌های فوق توزیع و انتقال، در این مقاله یک الگوریتم جدید برای تعیین جهت خط در خطوط انتقال پیشنهاد شده است. این الگوریتم دارای ناحیه مرده نمی‌باشد و همچنین برای انواع خط‌های داخلی و خارجی و بدون توجه به محل خط نیز به درستی عمل می‌کند. این عملکرد صحیح تحت شرایط خط‌های نزدیک رله نیز صادق است. الگوریتم در تشخیص خط سریع عمل کرده و جهت درست خط را در شرایط مختلفی از قبیل اشباع CT، نوسانات توان و وجود منابع قوی و ضعیف تشخیص می‌دهد. همچنین مقاومت خط و زاویه شروع خط نیز تأثیری در عملکرد صحیح الگوریتم ندارد. فرکانس نمونه‌برداری پایین الگوریتم پیشنهادی به آن قابلیت پیاده‌سازی صنعتی می‌دهد. جهت ارزیابی الگوریتم، شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار EMTP-RV انجام گرفته است. الگوریتم توسط داده‌های میدانی استخراج شده از پست ۲۳۰ kV مانشت، واقع در استان ایلام نیز اعتبارسنجی شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی دارای سرعت و قابلیت اطمینان مناسبی می‌باشد.

کلیدواژه: اشباع CT، حفاظت دیجیتال، رله جهتی، مؤلفه توالی مثبت، ناحیه مرده.

۱- مقدمه

در سیستم‌های قدرت، برداشتن سریع و صحیح خط‌های رخ داده می‌تواند در افزایش سطح پایداری و امنیت تأثیر زیادی داشته باشد. با توجه به حلقوی بودن شبکه‌های انتقال، شارش جریان در یک خط انتقال تحت خط از دو سمت می‌باشد. بنابراین به دست آوردن یک راه حل دقیق برای تعیین جهت خط می‌تواند سرعت عملکرد سیستم حفاظتی خطوط انتقال را افزایش دهد. رله‌های جهتی مرسوم، جهت جریان را با در نظر گرفتن یک مقدار مرجع که می‌تواند ولتاژ یا برخی جریان‌های دیگر باشد، تعیین می‌کنند و با توجه به اختلاف فاز بین این دو مقدار عمل می‌کنند.

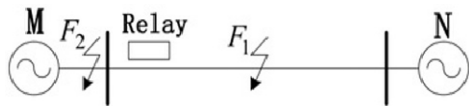
حفاظت جهتی مبتنی بر فازور در تشخیص جهت خط دقت مناسبی دارد. این روش به دلیل استفاده از فیلتر فوری، می‌تواند اثر هارمونیک‌ها را از بین ببرد و از لحاظ سخت‌افزاری پیاده‌سازی آن ساده است اما از نقاط ضعف این روش وجود ناحیه مرده است و برای برخی از خط‌ها ممکن است رله عملکرد صحیحی نداشته باشد و همچنین تحت شرایط اشباع CT پاسخ مناسبی نخواهند داشت [۱] و [۲].

در تحقیقات گذشته روش‌های مختلفی برای تعیین جهت خط در خطوط انتقال گزارش شده است. برخی روش‌ها بر اساس تفاضل مقادیر

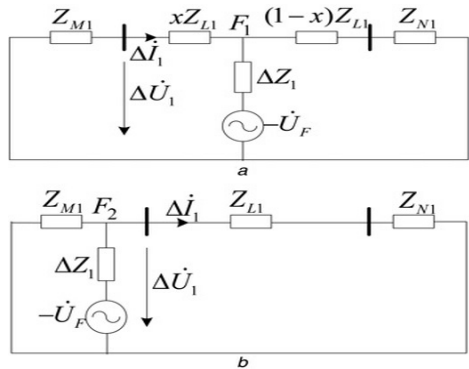
این مقاله در تاریخ ۲۳ آبان ماه ۱۳۹۴ دریافت و در تاریخ ۸ خرداد ماه ۱۳۹۵ بازنگری شد.

صبح دانیار، گروه برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، (email: s.daniar@mail.ilam.ac.ir).

الهه نوروزی، گروه برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، (email: e.norouzi1992@yahoo.com).



شکل ۲: دیاگرام سیستم قدرت.



شکل ۳: شبکه توالی مثبت خطا.

$$\Delta U_1 = \Delta I_1 Z_{M1} \quad (1)$$

و برای خطای پشت رله

$$\Delta U_1 = \Delta I_1 (Z_{L1} + Z_{N1}) \quad (2)$$

از آنجایی که امپدانس‌های توالی مثبت عموماً راکتیو هستند، اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ توالی مثبت برای یک خطا با استفاده از (۳) و (۴) به دست می‌آید

$$\Delta \varphi = \arg \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \approx -90^\circ \quad (3)$$

$$\Delta \varphi = \arg \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \approx 90^\circ \quad (4)$$

که (۳) برای یک خطای رو به جلو، (۴) برای خطا در پشت رله، ΔU_1 فازور ولتاژ توالی مثبت و ΔI_1 فازور جریان توالی مثبت می‌باشد.

جهت به دست آوردن پارامتر $\Delta \varphi$ ابتدا سیگنال‌های جریان و ولتاژ از یک فیلتر پایین‌گذر جهت حذف هارمونیک‌های بالا و جلوگیری از ایجاد پدیده درهم‌روی عبور می‌کنند. سپس برای استخراج مقادیر اصلاح‌شده جریان و ولتاژ مورد نیاز در پیاده‌سازی الگوریتم (۵) به کار برده می‌شود

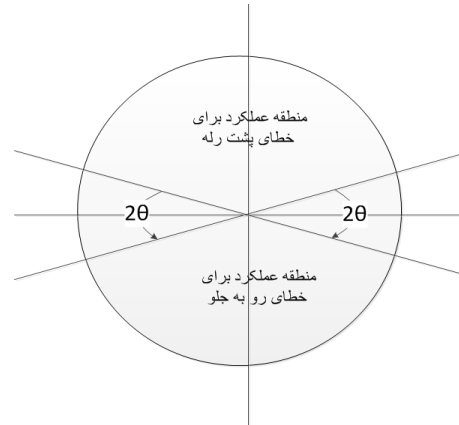
$$\Delta f(t) = [f(t) - f(t-2T)] - [f(t-2T) - f(t-4T)] \quad (5)$$

که در اینجا T دوره تناوب می‌باشد. برای عملکرد درست الگوریتم مؤلفه dc جریان توسط (۶) حذف می‌شود

$$d\Delta i(t) = \Delta i(t) - \Delta i(t - \Delta T) \quad (6)$$

که ΔT زمان نمونه‌برداری است. با استفاده از تبدیل abc به dq که در (۷) نمایش داده شده است نمونه‌های جدیدی به دست می‌آید

$$(F_d \ F_q)^T = C(\Delta f_a \ \Delta f_b \ \Delta f_c)^T \quad (7)$$



شکل ۱: مناطق عملکرد رله جهتی.

شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB جهت پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی مورد پردازش قرار گرفته‌اند. همچنین الگوریتم توسط داده‌های استخراج‌شده از پست ۲۳۰ KV مانشت از استان ایلام اعتبارسنجی شده که نشان می‌دهد این طرح قادر است پاسخ صحیحی را در شرایط مختلف خطا داشته باشد.

۲- شرح الگوریتم پیشنهادی

حفاظت‌های جهتی عموماً دو دسته می‌باشند: دسته اول حفاظت‌های مبتنی بر فازور و دسته دوم حفاظت‌های مبتنی بر نمونه‌های ولتاژ و جریان. در حفاظت‌های مبتنی بر فازور، مشخصه جهتی دارای دو ناحیه مجزا برای خطاهای جلو و پشت رله می‌باشد و بین این دو ناحیه، ناحیه دیگری با نام ناحیه مرده به وجود می‌آید که باعث عدم عملکرد مناسب این گونه حفاظت‌ها می‌شود. برای خطاهای نزدیک رله، با توجه به پایین رفتن سطح ولتاژ، کارایی این گونه حفاظت‌ها به شدت کاهش می‌یابد و در این شرایط عملکرد رله قابل اطمینان نیست. در شکل ۱ نواحی مرده توسط 2θ مشخص شده‌اند و زمانی که مقدار محاسبه‌شده در این نواحی قرار بگیرد، رله عملکردی نخواهد داشت.

در روش ارائه‌شده ترکیبی از هر دو روش مبتنی بر فازور و نمونه‌های جریان و ولتاژ به کار گرفته شده است.

برای الگوریتم ارائه‌شده از چند پارامتر استفاده شده است. اولین پارامتر از نوع اختلاف فاز بوده و با $\Delta \varphi$ نمایش داده می‌شود. این پارامتر از سرعت خیلی بالایی برای تشخیص جهت خطا برخوردار است. پارامتر دوم که از جنس توان متوسط پریونیت شده می‌باشد با id نمایش داده می‌شود. علاوه بر این دو پارامتر از یک آشکارساز اشباع CT استفاده شده که برای عملکرد صحیح الگوریتم در شرایط اشباع مورد نیاز است. این موارد در بخش‌های بعدی توضیح داده شده‌اند.

۲-۱ الگوریتم محاسبه $\Delta \varphi$

در یک سیستم قدرت می‌توان از مؤلفه‌های توالی مثبت جریان و ولتاژ برای تشخیص جهت خطا استفاده کرد. شکل ۲ دیاگرام یک سیستم قدرت را نشان می‌دهد. با به کار بردن اصل جمع آثار، می‌توان مؤلفه‌های خطای توالی مثبت را برای خطاهای رو به جلو و پشت رله به دست آورد [۱]. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، Z_{M1} ، Z_{L1} و Z_{N1} به ترتیب امپدانس‌های توالی مثبت منبع M ، خط و منبع N و ΔZ_1 امپدانس خطا می‌باشد.

همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود برای خطاهای رو به جلو و پشت رله می‌توان معادلات زیر را به کار برد. برای خطای رو به جلو

$$180^\circ + \theta < \Delta\phi < 360^\circ - \theta \quad (14)$$

$$\theta < \Delta\phi < 180^\circ - \theta \quad (15)$$

که (۱۴) برای خطای رو به جلو و (۱۵) برای خطاهای پشت رله به کار می‌رود.

(۲) زمانی که $|\Delta\dot{U}_1| < U_{\min 1}$ و $|\Delta\dot{I}_1| > I_{\min 2}$ باشد معادلات به صورت زیر تغییر می‌کنند

$$\Delta\dot{U}'_1 = \Delta\dot{U}_1 - 0.5\Delta\dot{I}_1 Z_{L1} \quad (16)$$

که $Z_{L1} = R_1 + jX_1$ امپدانس حفاظتی توالی مثبت است و (۱۷) و (۱۸) به ترتیب برای خطاهای رو به جلو و پشت رله به کار می‌روند

$$180^\circ + \theta < \Delta\phi = \arg \frac{\Delta\dot{U}'_1}{\Delta\dot{I}_1} < 360^\circ - \theta \quad (17)$$

$$\theta < \Delta\phi = \arg \frac{\Delta\dot{U}'_1}{\Delta\dot{I}_1} < 180^\circ - \theta \quad (18)$$

(۳) زمانی که $|\Delta\dot{U}_1| > U_{\min 1}$ و $I_{\min 1} < |\Delta\dot{I}_1| < I_{\min 2}$ باشد، معادلات به صورت زیر تغییر خواهند کرد

$$\Delta\dot{U}''_1 = \Delta\dot{U}_1 - \Delta\dot{I}_1 Z_{L1} \quad (19)$$

اگر

$$|\Delta\dot{U}''_1| > |\Delta\dot{U}_1| \quad (20)$$

یعنی خطا رو به جلو بوده و اگر

$$|\Delta\dot{U}''_1| < |\Delta\dot{U}_1| \quad (21)$$

خطا پشت رله اتفاق افتاده است.

۲-۲ الگوریتم محاسبه $id [19]$

در این الگوریتم از مقدار توان متوسط برای تعیین جهت خطا استفاده می‌شود. با توجه به شکل ۴ اگر اختلاف بین جریان و ولتاژ ۹۰ درجه باشد، مقدار توان متوسط در یک نیم‌سیکل برابر صفر خواهد بود. در صورتی که این اختلاف ۱۸۰ درجه باشد، توان متوسط در یک نیم‌سیکل مقداری منفی خواهد بود و اگر هم‌فاز باشند، توان متوسط در یک نیم‌سیکل مقداری مثبت خواهد داشت. با توجه به همین اصل می‌توان جهت خطا را تشخیص داد.

از آنجایی که سیگنال‌های حفاظتی جریان و ولتاژ ممکن است دارای هارمونیک‌های بالا و مؤلفه dc باشند، با استفاده از یک فیلتر کسینوسی که در (۲۲) بیان شده است فیلتر می‌شوند

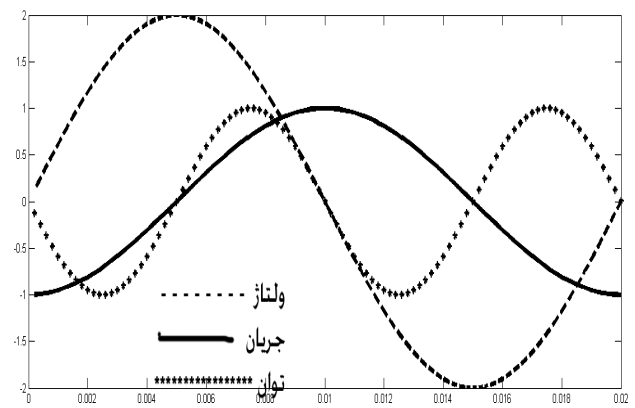
$$u_{f(m)} = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m u(k) \cos(k \frac{2\pi}{m}) \quad (22)$$

که در این رابطه $u(k)$ نمونه ولتاژ اولیه و $u_f(m)$ نمونه ولتاژ فیلتر شده m ام هستند و m تعداد نمونه‌ها در یک دوره تناوب اصلی است. برای نمونه‌های جریان نیز فیلتری مشابه همین فیلتر به کار می‌رود.

نمونه‌های جریان توالی مثبت توسط (۲۳) به دست می‌آید. برای ولتاژ نیز همین رابطه به کار برده می‌شود

$$i_1 = \frac{1}{3} (I_a + aI_b + a^2 I_c) \quad (23)$$

$$a = 1 \angle 120^\circ$$



شکل ۴: اختلاف فاز ۹۰ درجه بین جریان و ولتاژ.

که در این رابطه C این گونه تعریف می‌شود

$$C = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (8)$$

که در آن $\theta = \omega t$ و فرکانس زاویه‌ای است.

توالی مثبت بعد از حذف شدن مؤلفه‌های توالی منفی و صفر مطابق با (۹) به دست می‌آید

$$(F_{dp} \ F_{qp})^T = (F_d \ F_q)^T - \frac{1}{\sqrt{2}\omega} \left(\frac{dF_q}{dt} \ -\frac{dF_d}{dt} \right)^T \quad (9)$$

که dF/dt در (۹) برابر است با

$$\frac{dF}{dt} = \frac{F(k+1) - F(k-1)}{2\Delta T} \quad (10)$$

سپس فازورهای ولتاژ و جریان توالی مثبت فرکانس اصلی به صورت (۱۱) و (۱۲) تعریف می‌شوند

$$\Delta\dot{U}_1 = V_{qp} + jV_{dp} \quad (11)$$

$$\Delta\dot{I}'_1 = I_{qp1} + jI_{dp1} \quad (12)$$

از آنجایی که بعد از فیلتر اندازه و زاویه امواج نسبت به حالت اولیه تغییر می‌کند، برای فرکانس نمونه‌برداری ۱ KHz داریم

$$\Delta\dot{I}_1 = I_{qp} + jI_{dp} = \Delta\dot{I}'_1 \times 3.2 \angle (-81^\circ) \quad (13)$$

برای برخی حالت‌های خاص سیستم یا شرایط خطا، مقادیر اصلاح شده جریان و ولتاژ در محل رله ممکن است برای مقایسه صحیح دارای دامنه کمی باشند. به عنوان مثال با وجود منبع قوی در سیستم که در نتیجه به هم پیوستگی زیاد خطوط انتقال و تعدد واحدهای تولیدی در آن بخش حاصل می‌شود، رخداد یک خطای نزدیک رله، سطح ولتاژ توالی مثبت را به شدت کاهش می‌دهد و با وجود منبع ضعیف در شبکه که در نتیجه تنک‌بودن شبکه انتقال و کمبود واحدهای تولیدی در آن بخش حاصل می‌شود، با رخداد خطا در پایانه دوردست خط انتقال، سطح جریان توالی مثبت کاهش می‌یابد. برای این شرایط راه‌حلهایی به شرح زیر ارائه شده است.

ابتدا دو گروه مقدار آستانه تعیین می‌شود (گروه ۱: $U_{\min 1}$ و $I_{\min 1}$ و گروه ۲: $U_{\min 2}$ و $I_{\min 2}$) و سپس الگوریتم با توجه به حالات زیر عمل می‌کند:

(۱) زمانی که $|\Delta\dot{U}_1| > U_{\min 2}$ و $|\Delta\dot{I}_1| > I_{\min 2}$ باشد برای تعیین جهت خطا داریم

در این معادلات i_r جریان خروجی CT، m تعداد نمونه‌ها در یک سیکل، ضریب اطمینان و I_r اندازه جریان خطا می‌باشد که می‌تواند از طریق الگوریتم فوریه تخمین زده شود.

اگر CT اشباع شود، اندازه del_2 بیشتر از Th می‌شود و پارامتر C که بیان‌کننده وضعیت اشباع CT است مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد. الگوریتم آشکارسازی اشباع معرفی شده، بعد از حدود یک‌چهارم سیکل از شروع خطا، پاسخ درست را می‌دهد.

۲-۴ آشکارسازی خطا

قبل از به دست آوردن پارامترهای ذکر شده، ابتدا تشخیص خطا توسط الگوریتم آشکارسازی خطا صورت می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نیز با در نظر گرفتن زمان آشکارسازی خطا به دست آمده است. الگوریتم ارائه شده در [۲۱] برای آشکارسازی خطا به کار گرفته شده که روش مقایسه نمونه را به کار برده و دارای سرعت مناسبی در آشکارسازی خطا می‌باشد. این روش از اختلاف بین نمونه‌ها با نمونه‌های قبل و مقایسه آن با یک مقدار آستانه استفاده کرده است. همچنین برای آشکارسازی خطا در حالت نوسانات توان از الگوریتم ارائه شده در [۲۲] استفاده شده است. این مقاله از اختلاف نمونه‌های توالی منفی جریان و مقایسه آن با مقدار آستانه استفاده کرده است. در مجموع ترکیب هر دو روش موجب آشکارسازی خطا در همه شرایط می‌شود.

۲-۵ برازش منحنی ترکیب پارامترهای به دست آمده

شرایط مختلف عملکردی الگوریتم که در روش پیشنهادی بررسی شده‌اند عبارتند از تغییرات مقاومت خطا، تغییرات زاویه شروع خطا، قدرت اتصال کوتاه منابع دو طرف، نوسانات توان، اشباع CT، تغییرات محل وقوع خطا (پشت رله، نزدیک رله حفاظتی و ...) و تغییر نوع خطا (تک‌فاز، سه‌فاز، دوفاز به زمین و دوفاز). با در نظر گرفتن کلیه شرایط مذکور جدولی مانند جداول ۱ و ۲ تنظیم شده است. بر اساس داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها در شرایط مختلف، برازش منحنی صورت گرفته است. این برازش منحنی مبتنی بر روش بهینه‌سازی حداقل مربعات می‌باشد و حاصل این برازش معادله‌ای است که بر اساس آن جهت خطا تشخیص داده می‌شود.

در روش برازش منحنی، تلاش می‌شود با داشتن تعدادی داده آزمایشگاهی بتوان بهترین معادله‌ای را که از این نقاط عبور می‌کند پیدا کرد. این معادله الزاماً از همه داده‌ها عبور نمی‌کند اما بهترین معادله‌ای خواهد بود که به داده‌ها نزدیک است. در برازش منحنی تابعی با درجه پایین که دارای کمترین خطا باشد به دست خواهد آمد. با فرض این که K نقطه به صورت (x_i, y_i) وجود داشته باشد و به دست آوردن تابع $p(x)$ بر اساس این نقاط مد نظر باشد، تقریب حداقل مربعات به صورت (۲۹) محاسبه خواهد شد

$$e = \sum_{i=1}^K (y_i - p(x_i))^2 \quad (29)$$

در این رابطه ضرایب معادله $p(x)$ به نحوی به دست می‌آید که e حداقل شود.

داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها تحت شرایط مختلف، بیش از ۱۰۰۰ داده بوده است و برازش با دقت مناسبی بر اساس این داده‌ها انجام گردیده و معادله‌ای تنظیم شده که خطاهای جلو و پشت رله را تشخیص می‌دهد.

جدول ۱: نمونه‌ای از پارامترهای به دست آمده برای خطای سه‌فاز داخلی نزدیک رله.

C	id	$\Delta\varphi$
۰	۰٫۱	-۱٫۶
۰	۱	-۱٫۶
۱	۰٫۵	-
۰	-	-۳٫۱
۰	-۰٫۲۵	-۳٫۱
۰	۱	-۱٫۶

خطا با مقاومت بالا ($\Omega = 150$)
نوسانات توان
اشباع CT
منبع قوی
منبع ضعیف
زاویه شروع خطای 180°

جدول ۲: نمونه‌ای از پارامترهای به دست آمده برای خطای تک‌فاز در پشت رله.

C	id	$\Delta\varphi$
۰	-۰٫۶	۱٫۶
۰	۰	۱٫۵
۱	-۱	۱٫۵
۰	-۰٫۲۵	۱٫۶
۰	-۱	۱٫۶
۰	-۱	۱٫۶

خطا با مقاومت بالا ($\Omega = 150$)
نوسانات توان
اشباع CT
منبع قوی
منبع ضعیف
زاویه شروع خطای 180°

با تقسیم توان متوسط در یک نیم‌سیکل بر توان ظاهری، شاخص id تعریف می‌شود که با توجه به مقدار آن جهت خطا تعیین می‌شود. اگر این شاخص ۱ شد یعنی خطا در جلوی رله و اگر -۱ شد یعنی خطا پشت رله اتفاق افتاده است

$$id = \frac{P}{S} = \frac{\frac{2}{m} \sum_{k=\frac{m}{\tau}+1}^{\frac{\tau m}{\tau}} u_1(k+s) i_1(k)}{U_{rms} I_{rms}} \quad (24)$$

در این رابطه S حساسیت رله است و با توجه به این که در صورت خطا اختلاف فاز بین نمونه‌های جریان و ولتاژ توالی مثبت تقریباً 90° درجه است، حساسیت را برابر $-m/4$ قرار می‌دهیم تا مقدار توان متوسط و id صفر نشود.

مقادیر مؤثر ولتاژ و جریان توسط (۲۵) و (۲۶) تعیین می‌شوند

$$I_{rms} = \frac{\pi I_{av}}{2\sqrt{2}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}m} \sum_{k=1}^m |i_1(k)| \quad (25)$$

$$U_{rms} = \frac{\pi U_{av}}{2\sqrt{2}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}m} \sum_{k=\frac{m}{\tau}+1}^m |u_1(k+s)| \quad (26)$$

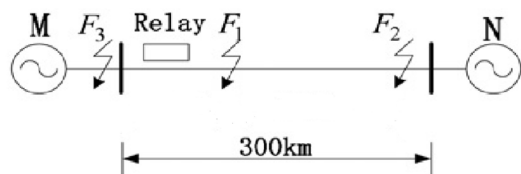
I_{av} و U_{av} به ترتیب مقدار متوسط ولتاژ و جریان در یک نیم‌سیکل است. همچنین نمونه‌های ولتاژ را باید به اندازه τm تأخیر داد تا برای خطاهای نزدیک رله که ولتاژ خیلی پایین می‌آید، رله عملکرد مناسبی داشته باشد.

۲-۳ الگوریتم آشکارسازی اشباع CT [۲۰]

جهت آشکارسازی اشباع CT با استفاده از مشتق دوم جریان و مقایسه آن با مقدار آستانه Th که در (۲۷) و (۲۸) بیان شده است، عمل می‌شود

$$del_2(n) = i_r(n) - 2i_r(n-1) + i_r(n-2) \quad (27)$$

$$Th = k\sqrt{2}I_r \left[2 \sin \frac{\pi}{m} \right] \quad (28)$$



شکل ۶: سیستم انتقال شبیه‌سازی شده.

می‌کند در نظر گرفته شده و این معادله در (۳۰) آورده شده است. همچنین $\Delta\phi$ برحسب رادیان تعریف شده تا همه پارامترهای بررسی شده در یک رنج نزدیک به هم قرار گیرند و مقدار آن برای خطاهای رو به جلو (بین $-pi$ تا صفر) و برای خطاهای پشت رله (بین صفر تا pi) تعریف شده است

$$q = (2.8C - 2.8)\Delta\phi + 7id \quad (30)$$

اگر $q > 0$ شد یعنی خطا جلوی رله و در صورتی که $q < 0$ شد، خطا در پشت رله رخ داده است. در شکل ۵ روندنمای مربوط به الگوریتم پیشنهادی نشان داده شده است.

۳- شبیه‌سازی

۳-۱ شبیه‌سازی توسط EMTP-RV

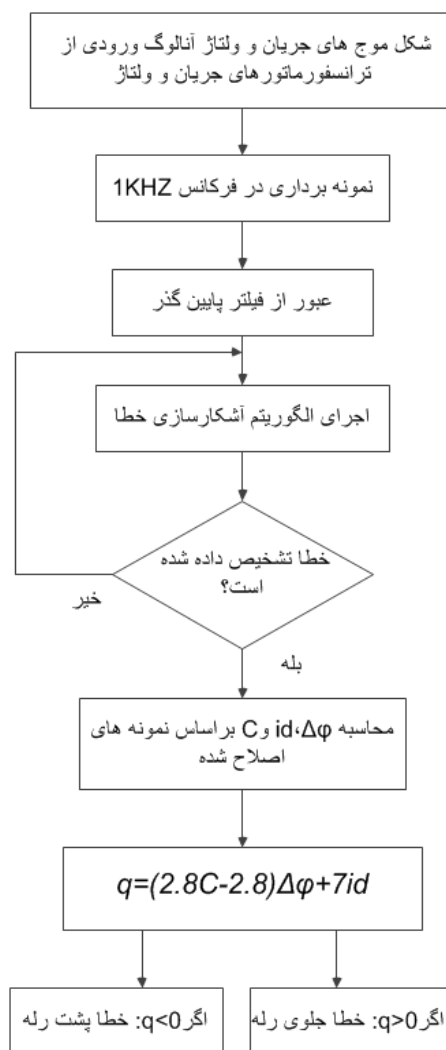
برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی شبیه‌سازی‌های بسیاری توسط نرم‌افزار EMTP-RV انجام گرفته که در اینجا فقط چند مورد از آنها آورده شده است. شکل ۶ یک خط انتقال ۵۰۰ KV را نشان می‌دهد [۱]. فرکانس نمونه‌برداری ۱ KHz، فرکانس سیستم نیز ۵۰ Hz و فرکانس قطع فیلتر پایین‌گذر ۱۰۰ Hz در نظر گرفته شده است. اختلاف فاز بین منابع M و N ، 20° و نسبت تبدیل ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان به ترتیب $500KV/100V$ و $1250A/5A$ است. در همه شبیه‌سازی‌های این بخش فرض بر این است که خطا در 0.2 sec رخ داده است. مقادیر آستانه جریان و ولتاژ نیز بدین صورت تعریف می‌شوند: $U_{min1} = 0.5V$ ، $I_{min1} = 0.2A$ ، $U_{min2} = 2V$ و $I_{min2} = 1A$. پارامترهای مورد نیاز دیگر نیز در زیر آورده شده‌اند

$$\begin{aligned} Z_{m1} &= 1.05 + j43.18 \Omega & Z_{m2} &= j29.09 \Omega \\ Z_{n1} &= 1.06 + j44.92 \Omega & Z_{n2} &= j37.47 \Omega \\ R_l &= 0.2 \Omega/km & R_c &= 0.115 \Omega/km \\ L_l &= 0.898 mH/km & L_c &= 2.289 mH/km \\ C_l &= 0.013 \mu F/km & C_c &= 0.005 \mu F/km \end{aligned}$$

به منظور شبیه‌سازی اشباع CT از اطلاعات [۲۳] استفاده شده که مشخصات CT و منحنی مغناطیس‌شوندگی آن به ترتیب در جدول ۳ و شکل ۷ نمایش داده شده است.

شبیه‌سازی اول: در شبیه‌سازی اول فرض شده که یک خطای سه‌فاز نزدیک و در جلوی رله (F_1) رخ داده است. نتایج شبیه‌سازی مربوط به این خطا در شکل ۸ آورده شده است. در این شبیه‌سازی نمودار اول مربوط به $\Delta\phi$ ، نمودار دوم id و نمودار سوم q می‌باشد. همان طور که در شکل دیده می‌شود الگوریتم در کمتر از ۱۰ میلی‌ثانیه جهت درست خطا را تشخیص می‌دهد.

شبیه‌سازی دوم: در این بخش یک خطای سه‌فاز در حالت نوسانات توان شبیه‌سازی شده است. مکان خطا پشت رله است (خطای F_2). در این حالت الگوریتم id به درستی عمل نکرده اما تشخیص خطا توسط الگوریتم جدید به درستی صورت گرفته است (شکل ۹).



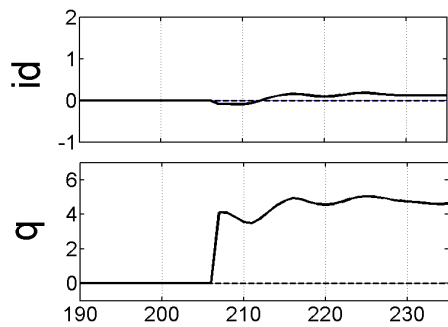
شکل ۵: روندنمای مربوط به الگوریتم پیشنهادی.

۲-۶ رابطه نهایی تشخیص جهت خطا

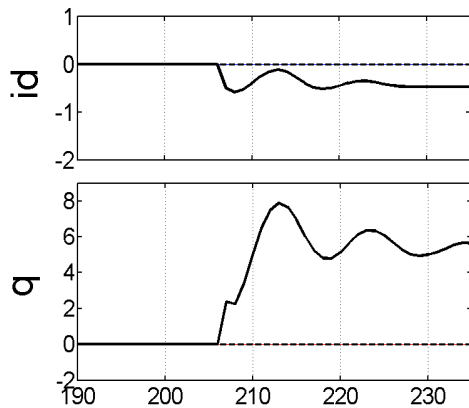
در بخش‌های قبل سه پارامتر اصلی و نیز نحوه ترکیب آنها در برازش منحنی مبتنی بر حداقل مربعات بیان شد که حاصل این برازش استخراج پارامتر q به عنوان معادله نهایی می‌باشد.

بایستی در مراحل برازش، مقادیر q انتخاب شده در کلیه حالات در محدوده‌هایی قرار گیرند که دقت معادله نهایی افزایش یابد. ابتدا مقدار صفر به عنوان آستانه تشخیص جهت مشخص شده و سپس بر اساس این تنظیم، مقادیر q مربوط به حالات مختلف لحاظ گردیده است. به عنوان مثال برای حالت‌هایی که مربوط به خطاهای رو به جلو هستند q ‌هایی بزرگ‌تر از ۴ و برای خطاهای پشت رله q ‌هایی کوچک‌تر از -4 لحاظ گردیده است. البته در طول روند برازش و رسیدن به معادله بهینه با تغییر q در بازه‌های گفته شده، خطای معادله نهایی به شدت کاهش یافته است به طوری که با در نظر گرفتن حاشیه اطمینان ذکر شده ($+4$ و -4) عملکرد نهایی منطق حفاظتی در کلیه موارد شبیه‌سازی شده صحیح بوده است. در واقع با استفاده از داده‌های موجود که نمونه‌هایی از آنها در جداول ۱ و ۲ بیان شد، ستون جدیدی در این جداول جهت پارامتر q تخصیص داده می‌شود و این ستون بر اساس تنظیم گفته شده و رعایت حاشیه اطمینان بیان شده تکمیل می‌گردد.

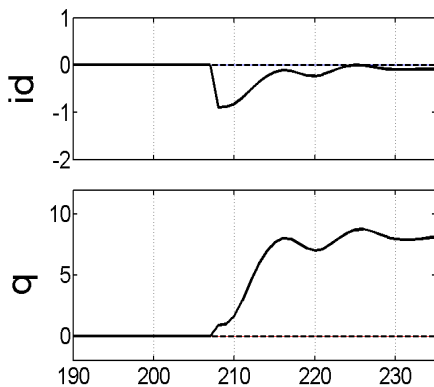
در به دست آوردن معادله نهایی پارامتر q ، اضافه کردن ضرایب خطی به عنوان یک رویکرد اساسی که پیاده‌سازی سخت‌افزاری معادله را عملی



شکل ۱۰: شبیه‌سازی مربوط به خطای تک‌فاز با مقاومت بالا.



شکل ۱۱: نتایج شبیه‌سازی خطای دوفاز با منبع قوی.

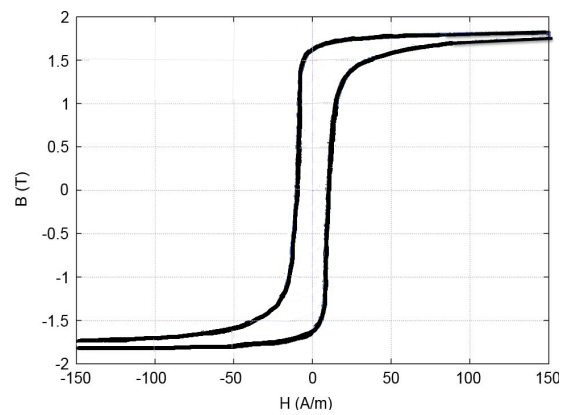


شکل ۱۲: نتایج شبیه‌سازی خطای دوفاز به زمین با منبع ضعیف.

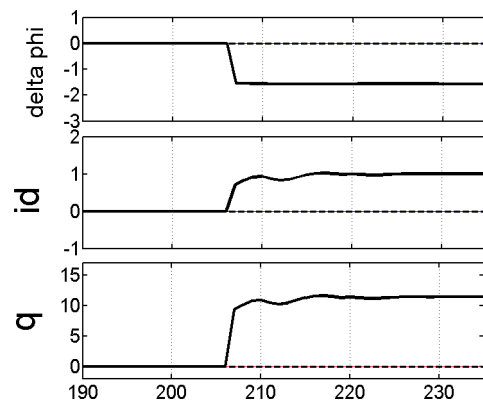
شبیه‌سازی چهارم: شکل ۱۱ نتایج شبیه‌سازی یک خطای دوفاز با وجود منبع قوی ($Z_m = 3\Omega$) را نشان می‌دهد. این خطا در نزدیکی رله حفاظتی (F_r) رخ داده است. در اینجا نیز با وجود این که مقدار id خیلی کمی دارد، الگوریتم پیشنهادی پاسخ درست را با سرعت مناسبی نشان می‌دهد.

شبیه‌سازی پنجم: در این شبیه‌سازی یک خطای دوفاز به زمین و در جلوی رله و انتهای خط انتقال (F_r) و با وجود منبع ضعیف ($Z_m = 16\Omega$) نشان داده شده است. در اینجا نیز همان طور که نشان داده شده id پاسخ صحیحی نمی‌دهد و الگوریتم پیشنهادی جهت درست خطا را نشان می‌دهد (شکل ۱۲).

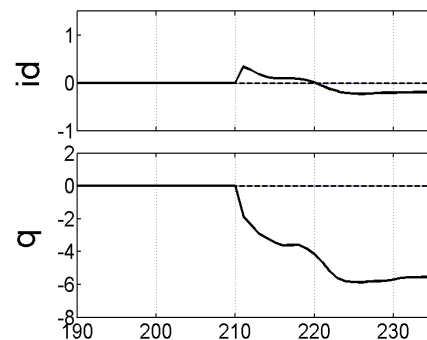
شبیه‌سازی ششم: در این بخش یک خطای سه‌فاز با وجود اشباع CT شبیه‌سازی شده است. با توجه به نتایج، شکل اول مربوط به $\Delta\phi$ است که به درستی عمل نمی‌کند و شکل بعدی مربوط به الگوریتم ارائه شده می‌باشد که خطا را سریع و به درستی تشخیص می‌دهد. خطا یک خطای رو به جلو و در نزدیکی رله رخ داده است (خطای F_r ، شکل ۱۳).



شکل ۷: منحنی مغناطیسی ترانسفورماتور جریان.



شکل ۸: نمودارهای مربوط به خطای سه‌فاز رو به جلو.

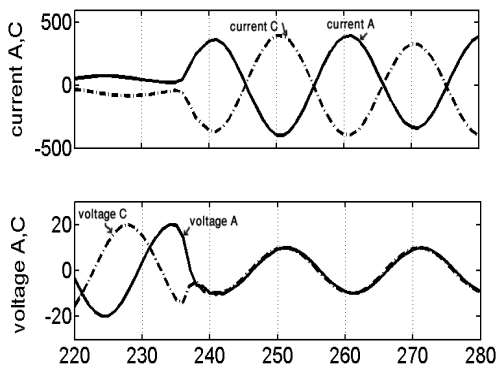


شکل ۹: نتایج شبیه‌سازی خطای سه‌فاز در حالت نوسانات توان و پشت رله.

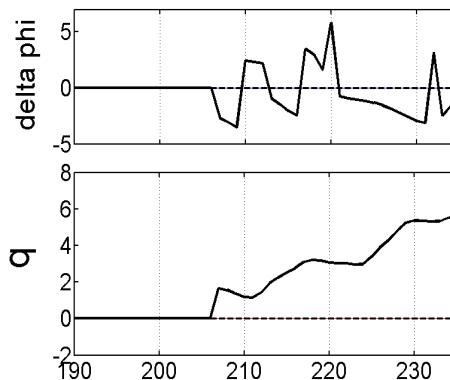
جدول ۳: مشخصات CT به منظور شبیه‌سازی اثر اشباع.

۲۵۰/۱	نسبت تبدیل
۵۰ Hz	فرکانس نامی
۰٫۴۴۸ M	متوسط طول هسته
۰٫۰۱۶۸ M ^۲	سطح مقطع
۲٫۱ Ω	مقاومت سیم‌پیچی
۰٫۸۵ MH	اندوکتانس هسته
۱٫۸۸ T	چگالی اشباع
۸ VA	بار نامی

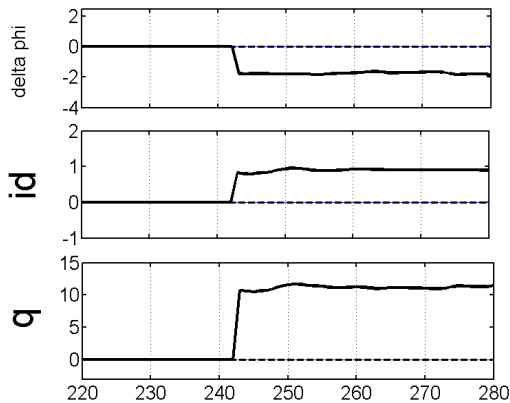
شبیه‌سازی سوم: در این بخش یک خطای تک‌فاز رو به جلو با مقاومت بالا (۱۵۰ اهم) و در وسط خط انتقال شبیه‌سازی شده که نتایج نشان می‌دهد با وجود این که id پاسخی نزدیک به صفر را نشان می‌دهد، الگوریتم پیشنهادی در این حالت نیز به درستی و با سرعت مناسبی جهت خطا را تشخیص داده است (شکل ۱۰).



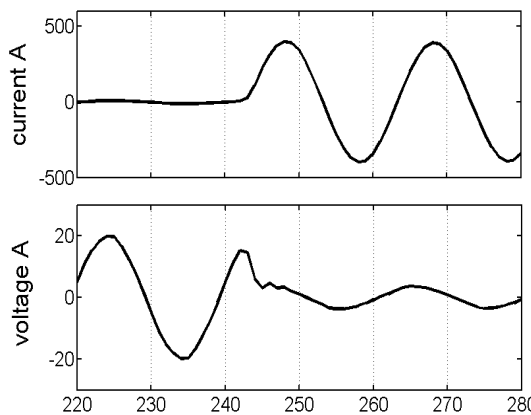
شکل ۱۶: شکل موج‌های جریان و ولتاژ مربوط به خطای دوفاز.



شکل ۱۳: خطای سه‌فاز در نزدیکی رله با وجود اشباع CT.



شکل ۱۷: نتایج شبیه‌سازی خطای دوفاز.



شکل ۱۴: شکل موج‌های جریان و ولتاژ فاز خطادار.

جدول ۴: امپدانس خط مربوط به پست مانشت.

$R_1 = 0.0044$	$R_2 = 0.0218$
$X_1 = 0.0252$	$X_2 = 0.0720$
$C_1 = 0.0471$	$C_2 = 0.0286$

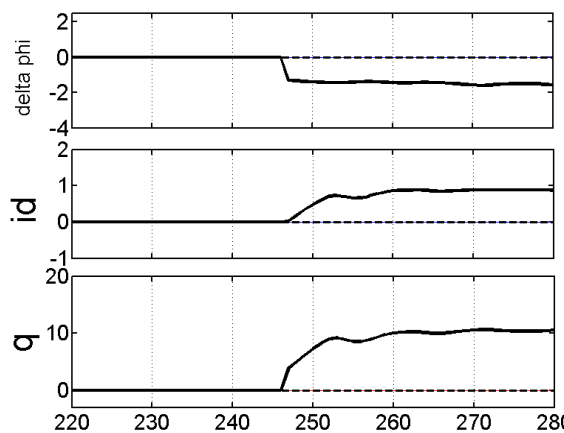
شبیه‌سازی اول این بخش مربوط به یک خطای تک‌فاز و رو به جلو می‌باشد. شکل موج‌های ولتاژ و جریان فاز خطادار در شکل ۱۴ و نتایج مربوط به این شبیه‌سازی در شکل ۱۵ آورده شده است. شبیه‌سازی دوم یک خطای دوفاز را نشان می‌دهد. شکل موج‌های مربوط به فازهای خطادار و نتایج شبیه‌سازی به ترتیب در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ دیده می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش جدید برای تعیین جهت خطا در رله‌های حفاظتی ارائه شده که این الگوریتم برای انواع خطاها و مکان‌های مختلف خطا، جهت را به درستی تشخیص می‌دهد. الگوریتم از سرعت قابل قبولی برخوردار است و فرکانس نمونه‌برداری پایین الگوریتم، قابلیت پیاده‌سازی صنعتی به آن می‌دهد. در قسمت شبیه‌سازی‌ها نیز دیده شد که الگوریتم در شرایط خطای با مقاومت بالا، زاویه شروع خطای متفاوت، اشباع CT، وجود منابع قوی و ضعیف و حالت نوسانات توان نیز به درستی عمل می‌کند و همچنین از داده‌های واقعی پست مانشت نیز برای ارزیابی الگوریتم استفاده شد.

مراجع

[1] B. Gu, J. Tan, and H. Wei, "High speed directional relaying algorithm based on the fundamental frequency positive sequence



شکل ۱۵: نتایج شبیه‌سازی مربوط به خطای تک‌فاز.

۳-۲ داده‌های واقعی پست مانشت

الگوریتم پیشنهادی روی داده‌های میدانی ثبت‌شده در رله ۷SA۶۱۲ و ۷SA۵۲۲ پست ۲۳۰ کیلوولت مانشت ایلام (برق منطقه‌ای غرب) اجرا شده و نتایج مناسبی به دست آمده است. اطلاعات مربوط به این پست در جدول ۴ نمایش داده شده است. برای استخراج شکل موج‌های جریان و ولتاژ این پست از نرم‌افزار DIGSI استفاده شده و شکل موج‌ها با فرمت مناسب ذخیره شده‌اند تا توسط نرم‌افزار MATLAB به کار گرفته شوند. در این بخش دو نمونه خطا آورده شده و الگوریتم روی آن پیاده‌سازی شده است.

قسمت اول شکل‌ها مربوط به الگوریتم $\Delta\phi$ ، قسمت دوم id و قسمت سوم الگوریتم پیشنهادشده در این مقاله است. در این حالت‌ها نیز همان‌طور که نشان داده شده الگوریتم سریع و به درستی عمل کرده است.

- [15] M. Sanaye-Pasand and O. P. Malik, "High speed transmission line directional protection evaluation using field data," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 14, no. 3, pp. 851-856, Jul. 1999.
- [16] M. Sanaye-Pasand and O. P. Malik, "High speed transmission system directional protection using an Elman network," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 13, no. 4, pp. 1040-1045, Oct. 1998.
- [17] M. Sanaye-Pasand and O. P. Malik, "Implementation and laboratory test results of an Elman network-based transmission line directional relay," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 14, no. 3, pp. 782-788, Jul. 1999.
- [18] T. S. Sidhu, H. Singh, and M. S. Sachdev, "An artificial neural network for directional comparison relaying of transmission lines," in *Proc. 6th Int. Conf. on Developments in Power System Protection*, pp. 282-285, Apr. 1997.
- [19] Z. N. Stojanovic and M. B. Djuric, "The algorithm for directional element without dead tripping zone based on digital phase comparator," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 2, pp. 377-383, Feb. 2011.
- [20] H. Dashti, M. Sanaye Pasand, and M. Davarpanah, "Fast and reliable CT saturation detection using a combined method," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 24, no. 3, pp. 1037-1044, Jul. 2009.
- [21] S. R. Mohanty, A. K. Pradhan, and A. Routray, "A cumulative sum-based fault detector for power system relaying application," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 23, no. 1, pp. 79-86, Jan. 2008.
- [22] P. K. Nayak, A. K. Pradhan, and P. Bajpai, "Detecting fault during power swing for a series compensated line," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Energy, Automation, and Signal, ICEAS'11*, 28-30 Dec. 2011.
- [23] F. Badrkhani Ajaei, M. Sanaye-Pasand, M. Davarpanah, A. Rezaei-Zare, and R. Iravani, "Compensation of the current-transformer saturation effects for digital relays," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 26, no. 4, pp. 2531-2540, Oct. 2011.
- [2] H. Gao and P. A. Crossley, "Design and evaluation of a directional algorithm for transmission-line protection based on positive-sequence fault components," *IEE Proc. Generation, Transmission, and Distribution*, vol. 153, no. 6, pp. 711-718, Nov. 2006.
- [3] G. Benmouyal and J. Mahseredjian, "A combined directional and faulted phase selector element based on incremental quantities," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 16, no. 4, pp. 478-484, Aug. 2001.
- [4] M. M. Eissa, "Evaluation of a new current directional protection technique using field data," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 566-572, Apr. 2005.
- [5] Y. Q. Xia, J. L. He, and K. K. Li, "A reliable digital directional relay based on compensated voltage comparison for EHV transmission lines," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 7, no. 4, pp. 1955-1962, Aug. 1992.
- [6] H. Jia-Li, Z. Yuan-Hui, and Y. Nian-Ci, "New type power line carrier relaying system with directional comparison for EHV transmission lines," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 429-436, Feb. 1984.
- [7] A. Ukil, B. Deck, and V. H. Shah, "Current-only directional overcurrent relay," *IEEE Sensors J.*, vol. 11, no. 6, pp. 1403-1404, Jun. 2011.
- [8] M. E. Masoud and M. M. A. Mahfouz, "Protection scheme for transmission lines based on alienation coefficients for current signals," *IET Generation, Transmission, & Distribution*, vol. 4, no. 11, pp. 1236-1244, Nov. 2010.
- [9] A. T. Johns, "New ultra-high-speed directional comparison technique for the protection of EHV transmission lines," *IEE Proc. C. Generation, Transmission, and Distribution*, vol. 127, no. 4, pp. 228-239, 1980.
- [10] M. Chamia and S. Liberman, "Ultra high speed relay for EHV/UHV transmission lines-development, design and application," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 1, no. 6, pp. 2104-2116, Nov. 1978.
- [11] M. Vitins, "A fundamental concept for high speed relaying," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 163-173, Jan. 1981.
- [12] X. Dong, Z. Geng, Y. Ge, F. Zhong, and B. Xu, "Application of wavelet transform in power system fault signal analysis," *Computer Standards & Interfaces*, vol. 20, no. 6-7, pp. 495, 1999.
- [13] A. L. O. Fernandez and N. K. I. Ghonaim, "A novel approach using a FIRANN for fault detection and direction estimation for high-voltage transmission lines," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 17, no. 4, pp. 894-900, Oct. 2002.
- [14] A. Poelll and K. Frohlich, "Two new methods for very fast fault type detection by means of parameter fitting and artificial neural networks," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 14, no. 4, pp. 1269-1275, Oct. 1999.

صباح دانیار تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۷ از دانشگاه های شاهد و علم و صنعت به پایان رسانده است و هم اکنون عضو هیأت علمی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه ایلام می‌باشد. نام‌برده قبل از پیوستنش به دانشگاه ایلام در سال‌های ۱۳۸۸ الی ۱۳۹۰ کارشناس ارشد بخش حفاظت سیستم‌های قدرت شرکت رای آوین فن بوده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: حفاظت سیستم‌های قدرت، شبکه‌های هوشمند انرژی، کنترل و دینامیک سیستم‌های قدرت، مطالعات شبکه.

الهه نوروزی در سال ۱۳۹۳ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه ایلام دریافت نمود. از سال ۱۳۹۳ تا هم اکنون نام‌برده به عنوان کارشناس فنی بخش GIS در شرکت توزیع برق استان ایلام به کار مشغول می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده شامل موضوعاتی مانند حفاظت سیستم های قدرت، سیستم های توزیع انرژی الکتریکی، اتوماسیون شبکه های قدرت و تاسیسات الکتریکی مدرن می‌باشد.