



انجمن مهندسين برق و الكترونيك ايران
شاخه ي تهران



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
قطب علمی قدرت

روشی جدید برای تشخیص و کلاسه‌بندی خطا در شبکه های انتقال با استفاده از منطق فازی

محمد افراشته داود عرب‌خابوری سید محمد شهرتاش
قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سیستمهای قدرت
دانشگاه علم و صنعت ایران

در حفاظت شبکه‌های انتقال شناسایی سریع و مطمئن نوع خطا یکی از نیازمندیهای اولیه محسوب می‌شود. از یک طرف آگاهی از نوع خطا برای الگوریتم‌های محلیابی مورد نیاز است و از طرف دیگر در طرحهای حفاظت دیستانس بعنوان پیش‌نیازی برای عملکرد مناسب رله‌های حفاظتی است [1].

روشهای مختلف موجود برای کلاسه‌بندی خطا را می‌توان در دو دسته جای داد. دسته اول از تغییراتی که در ولتاژها و جریانها بوجود می‌آید استفاده می‌کنند [2]- [8]. این تغییرات به کمیات دلتا^۱ یا مولفه‌های تحمیل شده^۲ مشهور هستند. دسته دوم که در دهه اخیر مورد توجه فراوانی قرار گرفته روشهایی هستند که مبتنی بر هوش مصنوعی، شبکه‌های عصبی، شناسایی الگوها، منطق فازی و ترکیبی از آنها هستند.

چکیده: در این مقاله روش جدیدی برای تشخیص و کلاسه‌بندی خطا در شبکه‌های انتقال با استفاده از منطق فازی ارائه شده است. الگوریتم معرفی شده از جریان فازها استفاده می‌کند و با استفاده از آنها وقوع خطا را تشخیص داده و نوع آن را شناسایی می‌کند. در این روش از سه شاخص زاویه فاز (یک شاخص برای هر فاز) و یک شاخص تشخیص خطای به زمین استفاده شده است. الگوریتم بر مبنای ۴۰ نمونه در سیکل آزمایش شده که در ۱۸ نمونه پس از وقوع خطا نوع آنرا شناسایی می‌کند. همچنین الگوریتم پیشنهادی در چارچوب حالات شبیه‌سازی شده دارای دقت ۱۰۰٪ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: کلاسه‌بندی خطا، خطوط انتقال، منطق فازی

۱. مقدمه

¹ - delta quantities

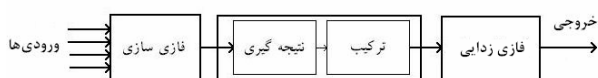
² - superimposed component



شده بدست می‌آورد و سپس با عمل عکس فازی‌سازی عضویت ورودی در دسته مربوطه را مشخص می‌کند. چنین کاربردی را می‌توان در [15] پیدا کرد. این مقاله از زاویه بردار جریان فازها (مؤلفه فرکانس شبکه) برای شناسایی نوع خطا استفاده می‌کند و نتایج بدست آمده دقت و سرعت الگوریتم پیشنهادی را اثبات می‌کند. از روش RFCDFT³ برای بدست آوردن شاخصهای تعریف شده استفاده شده است و سپس این شاخصها به سیستم فازی که در جعبه ابزار Fuzzy Logic در MATLAB [16] شبیه‌سازی شده اعمال می‌شود تا نوع خطا مشخص شود.

۲. الگوریتم

A: سیستم فازی: فرآیندی که در استفاده از سیستم فازی انجام می‌شود در شکل ۱ نشان داده شده است. فرآیند از مجموعه‌ای از قواعد و توابع عضویت فازی برای تصمیم‌گیری در مورد داده‌ها استفاده می‌کند. شاخصهای بدست آمده ابتدا به مقادیر فازی تبدیل می‌شوند تا قابل اعمال به قواعد فازی باشند. سپس سیستم فازی نتایج را به مقادیر قابل فهم تبدیل می‌کند.



شکل ۱: دیاگرام بلوکی سیستم فازی

B: اساس الگوریتم: الگوریتم بر این نکته استوار است که زاویه بردار جریان فاز خطا دار دارای تغییراتی است که می‌توان از روی آن وقوع خطا در هر فاز را به صورت جداگانه مشخص کرد. در این صورت برای هر فاز یک شاخص کلاسه‌بندی^۴ تعریف می‌شود. همچنین

Phadke از ضرایبی که از مولفه‌های توالی جریان و ولتاژ بدست آورد برای محاسبه امپدانس ظاهری و سپس کلاسه‌بندی بهره برد [2]. در [3] برای کلاسه‌بندی خطا از مولفه‌های کلارک^۱ جریان استفاده شده است. در روش دیگری از نمونه‌های ولتاژ و جریان تحمیل شده برای کلاسه‌بندی استفاده شده است [4]. Sakaguchi برای کلاسه‌بندی یک روش آماری را پیشنهاد کرد [5]. این روش از نمونه‌های جریان یا جریان و ولتاژ استفاده می‌کرد. در [6]-[8] از فیلتر کالمن استفاده شده است و نرخ تغییرات اندازه جریان تحمیل شده را بعنوان معیار کلاسه بندی خطاها معرفی کرده‌اند.

مقالات متعددی کلاسه‌بندی مبتنی بر شبکه عصبی را پیشنهاد کرده‌اند. به طور کلی از پنج نوع شبکه عصبی مختلف برای کلاسه بندی خطا استفاده شده است: (۱) Radial Basis (۲) Feature-Map (۳) Back-Propagation Learning (۴) Counter-Propagation و (۵) Function Vector Qusntization. در [9] این پنج نوع کلاسه‌بند شرح داده شده و کارآیی آنها مقایسه شده است. در سالهای اخیر از منطق فازی نیز استفاده شده است [10]-[15]. در [12] از فازی توأم با شبکه عصبی برای کلاسه‌بندی در یک شبکه چند-پایانه‌ای استفاده شده است.

در این مقاله یک روش ساده برای تشخیص و کلاسه‌بندی نوع خطا با استفاده از منطق فازی پیشنهاد شده است. در تئوری دسته‌های فازی همه حالات و شرایطی که نمی‌توان بوسیله یک مدل ریاضی در نظر گرفت با استفاده از قواعد و تعدادی تابع عضویت ساده مدنظر قرار می‌گیرند و نتایج درستی را بدست می‌دهند. سیستم‌های فازی از سه بخش اساسی تشکیل شده‌اند: فازی‌سازی، نتیجه‌گیری فازی و عکس فازی‌سازی.

این سیستم ورودیها را به صورت عامیانه^۲ دریافت می‌کند و درجه عضویت آنرا در هر دسته با توجه به قواعد تعریف

³ - Recursive Full Cycle Discrete Fourier Transform

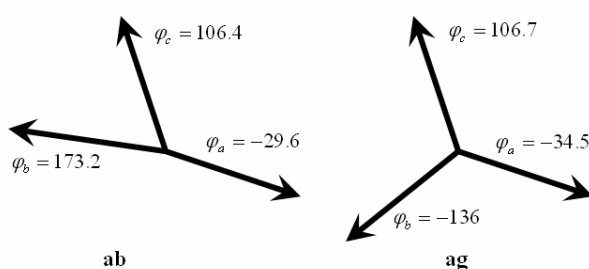
⁴ - Classification Index

¹ - Clarke components

² - linguistic



شکل ۴ زاویه فاز جریانها را برای خطاهای ag و ab در ۸۰٪ طول خط با مقاومت خطای ۵۰ اهم و زاویه قدرت ۳۰ درجه و زاویه وقوع خطای ۹۰ درجه نشان می‌دهد.



شکل ۴: زاویه فاز جریانها برای خطای ab و ag

بدین ترتیب می‌توان دریافت که تغییرات زاویه بردار جریان در فازهای خطادار حتی در شرایط وقوع خطای با مقاومت خطای بالا و در دورترین نقاط از محل رله و زاویه قدرت بالا نیز بسیار بیشتر از حالت عادی است. C: شاخصهای کلاسه‌بندی: برای ارزیابی این تغییرات نیاز به معیاری است که بتوان تغییرات را نسبت به آن سنجید. در معادله (۱) مقدار زاویه بردارهای جریان در حالت مرجع^۱ آمده است.

(۱)

$$j_{a-normal} = 0$$

$$j_{b-normal} = -120$$

$$j_{c-normal} = 120$$

و شاخصها طوری تعریف شده اند که مقدار انحراف زوایا از مرجع را نشان دهند:

(۲)

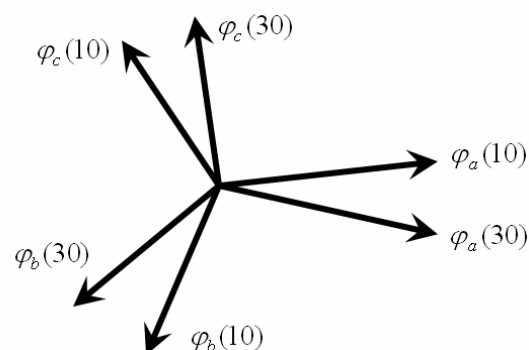
$$CI_a = |j_a - j_{a-normal}|$$

$$CI_b = |j_b - j_{b-normal}|$$

$$CI_c = |j_c - j_{c-normal}|$$

برای تشخیص خطاهای LL از LLG شاخص اندازه نسبت توالی صفر به توالی مثبت جریان استفاده شده است.

اگر در محدوده شبیه‌سازی شده برای زاویه قدرت $(d < 30^\circ)$ زوایای بردارهای جریان سه فاز را بدست آوریم مشاهده خواهیم کرد که هر چه زاویه قدرت زیاد می‌شود انحراف این زوایا نسبت به حالت مرجع زیادتر می‌شود. شکل ۲ این حالت را برای $d = 10$ و $d = 30$ نشان می‌دهد. مقدار این زوایا در جدول ۱ به طور خلاصه آمده است.

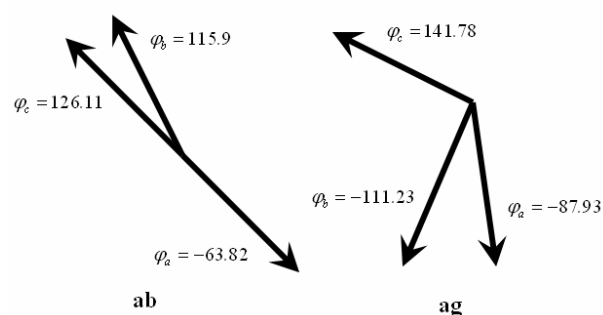


شکل ۲: تغییرات زوایای فاز با تغییر زاویه قدرت (d)

جدول ۱: زاویه فازها برای زوایای قدرت مختلف

$d = 30$	$d = 10$	
-۱۳,۵	۶,۱	j_a
-۱۳۳,۵	-۱۱۳,۸۸	j_b
۱۰۶,۵	۱۲۶,۱۱	j_c

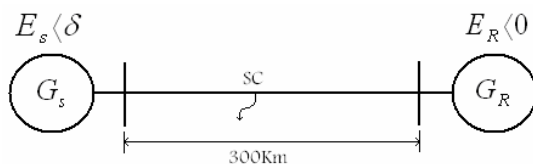
شکل ۳ همین زوایا را برای خطاهای ag و ab در ۲۰٪ طول خط با مقاومت خطای ۰ اهم و زاویه قدرت ۱۰ درجه و زاویه وقوع ۳۰ درجه نشان می‌دهد.



شکل ۳: زاویه فاز جریانها برای خطای ab و ag

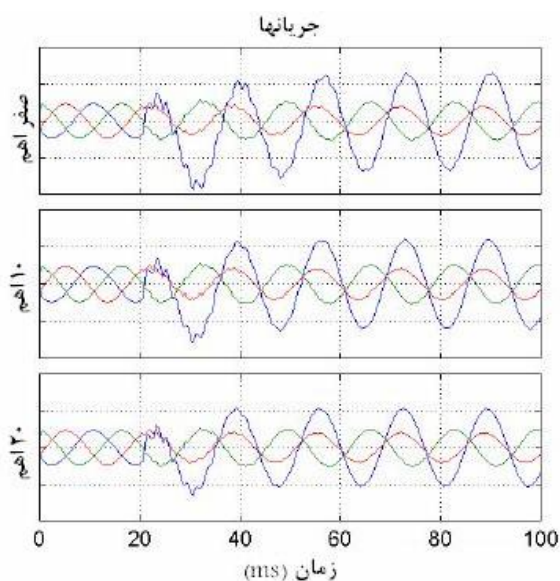
¹ - Reference Angles

A: شبکه نمونه: از سیستم قدرت ساده نشان داده شده در شکل ۵ [17] برای تولید جریان فازها تحت شرایط مختلف استفاده شده است. شبیه‌سازی برای حالت عادی و انواع خطاها با تغییر مقاومت خطا، زاویه وقوع خطا و زاویه قدرت در نقاط مختلف خط با استفاده از نرم افزار ATP [18] انجام گرفته است.



شکل ۵: سیستم قدرت نمونه

B: تأثیر محل، مقاومت و زاویه وقوع خطا در شکل موج جریانها: در شکل ۶ تأثیر مقاومت خطا در شکل موج جریان فازها تحت یک خطای cg نشان داده شده است که نشان دهنده کاهش دامنه جریان فاز خطا دار با افزایش مقاومت خطا است.



شکل ۶: تأثیر مقاومت خطا در شکل موج جریان

شکل ۷ نیز تأثیر محل خطا در شکل موج جریان را نشان می دهد. با توجه به شکل مشاهده می کنیم که خطاهایی که در انتهای خط رخ می دهند شکل موج

D: شاخص تشخیص زمین: برای تشخیص وقوع خطای به زمین شاخص چهارمی که اندازه نسبت توالی صفر به مثبت جریان است استفاده می شود.

(۳)

$$CI_g = \frac{|I_{a0}|}{|I_{a1}|}$$

شاخصهای کلاسه بندی برای وقوع خطا در ۶۰٪ طول خط با مقاومت ۲۵ اهم، زاویه وقوع ۰ و زاویه قدرت ۱۰ درجه در جدول ۲ به طور خلاصه آمده است.

جدول ۲: شاخصهای کلاسه بندی برای

$$d = 10 \text{ و } FIA = 0^\circ, FL = 60\%, R_f = 25$$

نوع خطا	CI_a	CI_b	CI_c	CI_g
ag	۵۳,۷۶	۴,۱۲	۵,۴۰	۰,۷۲
bg	۵,۴۰	۵۳,۷۶	۴,۱۲	۰,۷۲
cg	۴,۱۲	۵,۴۰	۵۳,۷۶	۰,۷۲
ab	۴۰,۲۰	۹۸,۱۱	۶,۱۱	۱,۹۷e-۷
bc	۶,۱۱	۴۰,۲۰	۹۸,۱۱	۱,۹۷e-۷
ca	۹۸,۱۱	۶,۱۱	۴۰,۲۰	۱,۹۷e-۷
abg	۷۰,۲۸	۱۱۳,۵۹	۴,۵۸	۰,۲۱
bcg	۴,۵۸	۷۰,۲۹	۱۱۳,۶۵	۰,۲۱
cag	۱۱۳,۷۵	۴,۵۸	۷۰,۳۸	۰,۲۱
abcg	۹۳,۶۶	۹۳,۵۷	۹۳,۶۸	۳,۰۴e-۹

برای حالت عادی و زاویه قدرت ۱۰ درجه شاخصها به صورت جدول ۳ است.

جدول ۳: شاخصهای کلاسه بندی در حالت عادی و $d = 10$

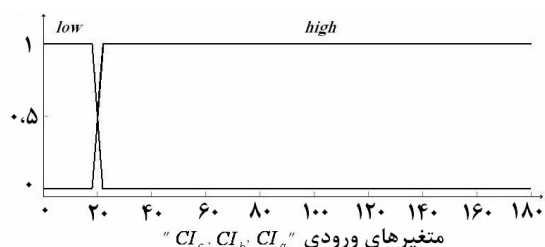
وضعیت	CI_a	CI_b	CI_c	CI_g
عادی	۶,۱۱	۶,۱۱	۶,۱۱	-۹ ۲,۳۱e

۳. شبکه نمونه و تأثیر محل، مقاومت و زاویه وقوع خطا در شکل موج جریانها



۴. توابع عضویت و قواعد سیستم فازی

دیاگرام شکل ۱ کلیات سیستم فازی را نشان می‌دهد و شامل قواعد فازی و توابع عضویت برای مقادیر ورودی و خروجی است که در زیر شرح داده می‌شوند.
A: توابع عضویت ورودی: سیستم فازی دارای چهار ورودی CI_a ، CI_b ، CI_c و CI_g است که توابع عضویت سه شاخص اول در شکل ۹ و شاخص تشخیص خطای به زمین در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

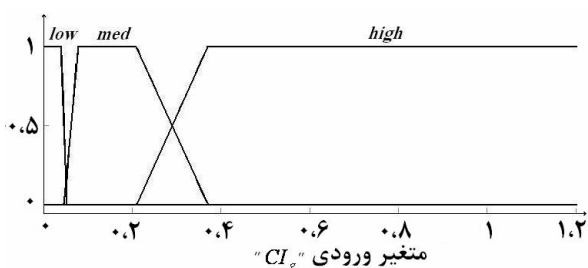


شکل ۹: توابع عضویت شاخصهای زاویه فاز

شاخصهای زاویه فاز دارای دو تابع عضویت low و high است که هر دو تابع عضویت دوزنقه‌ای با پارامترهای زیر هستند.

$$\text{low} : [-0.01 \quad 0 \quad 18.2 \quad 21.85]$$

$$\text{high} : [18.2 \quad 21.85 \quad 180 \quad 180.1]$$

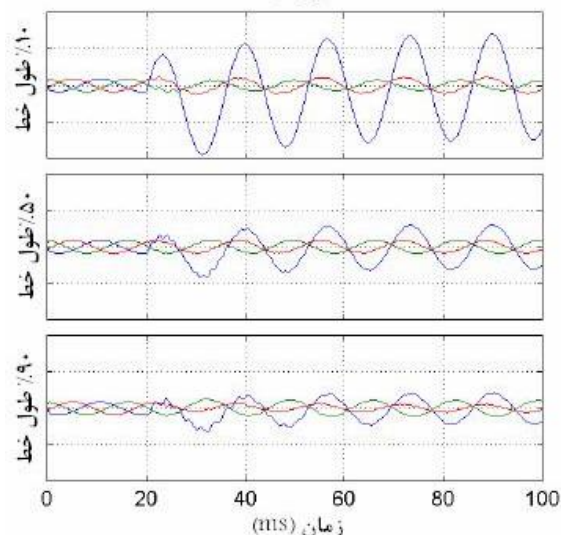


شکل ۱۰: توابع عضویت شاخص تشخیص خطای به زمین

شاخص تشخیص خطای به زمین شامل سه تابع عضویت low، med و high است که از نوع دوزنقه‌ای با پارامترهای زیر می‌باشند.

جریانها تغییرات خیلی کمی نسبت به قبل از خطا دارد و ممکن است تشخیص داده نشود.

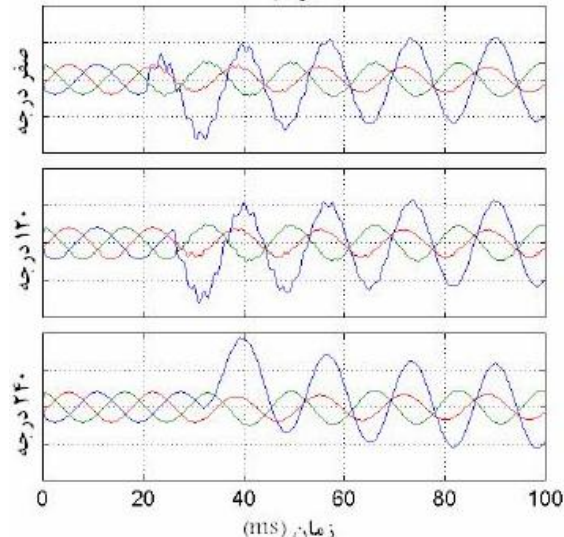
جریانها



شکل ۷: تأثیر محل خطا در شکل موج جریان

در شکل ۸ هم تأثیر زاویه وقوع خطا در شکل موجها نمایش داده شده است.

جریانها



شکل ۸: تأثیر زاویه وقوع خطا در شکل موج جریان

علاوه بر موارد فوق شرایط شبکه قبل از وقوع خطا در تغییراتی که بعد از خطا در شکل موجها بوجود می‌آید مؤثر است.



جدول ۵: مقادیر A، B و C برای توابع عضویت

خروجی

C	B	A	تابع عضویت
۱,۵	۱	۰,۵	عادی
۲,۵	۲	۱,۵	ag
۳,۵	۳	۲,۵	bg
۴,۵	۴	۳,۵	cg
۵,۵	۵	۴,۵	ab
۶,۵	۶	۵,۵	bc
۷,۵	۷	۶,۵	ca
۸,۵	۸	۷,۵	abg
۹,۵	۹	۸,۵	bcg
۱۰,۵	۱۰	۹,۵	cag
۱۱,۵	۱۱	۱۰,۵	abcg

سیستم فازی استفاده شده از قاعده ترکیب max و از روش فازی‌زدایی مرکز ثقل^۱ استفاده می‌کند.

۵. بررسی نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله برای پوشش مؤثر حالات مختلف خطا، شرایط زیر در نظر گرفته شده است.

R_f : مقاومت خط ۰، ۵، ۲۵ و ۵۰ اهم

FIA^۲: زاویه وقوع خط ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه

d : زاویه قدرت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه

FL^۳: محل وقوع خط ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰٪ طول خط

با توجه به شرایط متغیر در نظر گرفته شده ۱۹۲۰ حالت خطا شبیه سازی شده است، همچنین سه شبیه‌سازی نیز برای حالت عادی صورت گرفته است.

جریانهای سه فاز مربوط به حالات مختلف سیستم با استفاده از برنامه ATP تولید شده است و پس از بدست آوردن شاخصها با استفاده از محیط برنامه‌نویسی MATLAB، توانمندی الگوریتم پیشنهادی در کلاس‌بندی خطا با استفاده از جعبه ابزار منطق فازی

low: [0 0 0.045 0.05]

med: [0.05 0.075 0.21 0.37]

high: [0.21 0.37 1.1 inf]

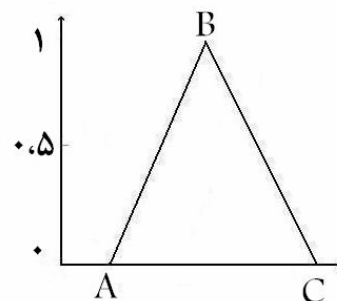
در صورتی که خطای LL یا LLLG رخ دهد یا خطایی رخ ندهد مقدار CI_g مقدار خیلی کوچکی است. برای خطای LLG این مقدار در دسته med قرار می‌گیرد و برای خطای LG در دسته high قرار می‌گیرد.

B: قواعد فازی: سیستم نتیجه‌گیر فازی دارای ۱۱ وضعیت است که در جدول ۴ خلاصه شده‌اند.

جدول ۴: قواعد سیستم فازی

وضعیت سیستم	قاعده			
	CI_g	CI_c	CI_b	CI_a
عادی	low	low	low	low
ag	high	low	low	high
bg	high	low	high	low
cg	high	high	low	low
ab	low	low	high	high
bc	low	high	high	low
ca	low	high	low	high
abg	med	low	high	high
bcg	med	high	high	low
cag	med	high	low	high
abcg	low	high	high	high

C: توابع عضویت خروجی: برای خروجی سیستم که می‌تواند نشان دهنده حالت عادی یا یکی از انواع خطا باشد از تابع عضویت مثلثی همانند شکل ۱۱ استفاده شده است که مقادیر A، B و C در جدول ۵ آمده است.



شکل ۱۱: تابع عضویت مثلثی برای خروجی سیستم فازی

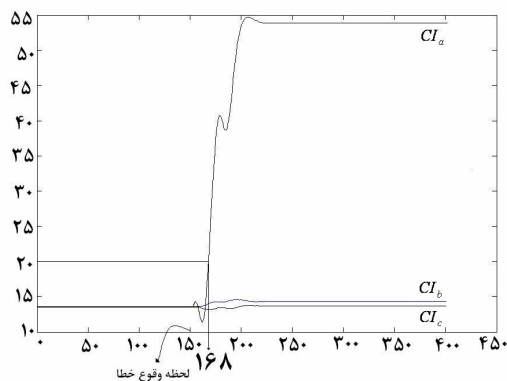
¹ - centroid

² - Fault Inception Angle

³ - Fault Location



در ۱۸ نمونه پس از وقوع خطا از معیار تجاوز کرده و خطا تشخیص و کلاسه‌بندی می‌شود.



شکل ۱۲: شاخصهای زاویه فاز برای خطای ag

$$d = 30, FIA = 0^\circ, R_f = 25\Omega, FL = 60\%$$

MATLAB آزمایش شده است. در جداول ۶-۹ بعضی از نتایج نشان داده شده است.

جدول ۶: خروجی FIS

$$d = 10, FIA = 0, R_f = 0, FL = 20\%$$

abcg	cag	bcg	abg	ca	bc	ab	cg	bg	ag	¹ FT
۱۱	۱۰	۹,۰۴	۸	۷	۶	۵	۴	۲,۹۶	۲	خروجی

جدول ۷: خروجی FIS

$$d = 30, FIA = 90, R_f = 0, FL = 20\%$$

abcg	cag	bcg	abg	ca	bc	ab	cg	bg	ag	FT
۱۱	۱۰	۹,۰۱	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	خروجی

جدول ۸: خروجی FIS برای

$$d = 30, FIA = 0, R_f = 50, FL = 20\%$$

abcg	cag	bcg	abg	ca	bc	ab	cg	bg	ag	FT
۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	خروجی

جدول ۹: خروجی FIS برای

$$d = 10, FIA = 0, R_f = 50, FL = 80\%$$

abcg	cag	bcg	abg	ca	bc	ab	cg	bg	ag	FT
۱۱	۱۰	۹	۸	۶,۹۹	۶	۵,۰۱	۴	۳	۲	خروجی

۶. نتیجه‌گیری

روش پیشنهادی یک راه‌حل بهنگام برای تشخیص و کلاسه‌بندی خطا است که تنها از نمونه‌های جریان برای تشخیص و کلاسه‌بندی استفاده می‌کند. مزایای الگوریتم به شرح زیر می‌باشد:

- ۱) استفاده از تنها سه اندازه‌گیری
- ۲) روش پیشنهادی قابلیت شناسایی هر ده نوع خطا و همچنین حالت عادی در سیستم را دارد
- ۳) خطا در کمتر از نصف سیکل تشخیص و نوع آن شناسایی می‌شود
- ۴) الگوریتم در چارچوب در نظر گرفته شده بدون اشتباه است.
- ۵) روش پیشنهادی در شرایط مختلف سیستم قبل از وقوع خطا و لحظه وقوع خطا، مقاومت و محل وقوع خطا بخوبی کلاسه‌بندی خطا را انجام می‌دهد.

با توجه به جداول ۶ تا ۹ مشاهده می‌شود که همه خطاها به درستی کلاسه‌بندی شده‌اند و الگوریتم پیشنهادی اشتباهی در شناسایی نوع خطا نداشته و بنابراین دقت الگوریتم در محدوده در نظر گرفته شده (محل وقوع، مقاومت خطا، زاویه قدرت و زاویه وقوع خطا) ۱۰۰٪ بوده است. سرعت کلاسه‌بندی الگوریتم قابل قبول است و در کمتر از نیم سیکل پس از وقوع خطا، نوع آنرا شناسایی می‌کند. به عنوان نمونه شکل ۱۲ شاخصهای زاویه فاز را برای خطای ag نشان می‌دهد که CI_a (شاخص مربوط به فاز خطادار)

¹ - Fault Type



Scheme", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 15, pp. 902-907, July 2000.

- [14]. H. Wang, W. W. Keerthipala, "Fuzzy-Neuro Approach to Fault Classification for Transmission Line Protection", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 13, pp. 1093-1102, Oct. 1998.
- [15]. A. Ferrero, S. Sangiovanni, E. Zappitelli, "A Fuzzy Set Approach to Fault-Type Identification in Digital Relaying", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 10, pp. 169-175, Jan. 1995.
- [16]. Mathworks, Inc., MATLAB, Ver. 7.
- [17]. C. A. Gross, "Power System Analysis"
- [18]. Alternative Electromagnetic Transient Program (ATP)

۷. منابع

- [1]. A. G. Phadke, "Computer Relaying for Power Systems", New York: Wiley, 1988.
- [2]. A.G.Phadke, M.Ibrahim and T.Hlibka, "Fundamental Basis for Distance Relaying with Symmetrical Components", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 96, No.2, March/April 1977, pp. 635-646.
- [3]. W.D. Breingan, M.M. Chen and T.F. Gallen, "Laboratory Investigation for a Digital System for the Protection of Transmission Lines," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS 98, No. 2, March/April 1979, pp. 350-368.
- [4]. M.M. Elkateb and W.J. Cheetham, "A New Approach to High Speed Selection," Second International Conference on Developments in Power-System Protection, June 1980, London, pp. 171-176.
- [5]. T. Sakaguchi, "A Statistical Decision Theoretical Approach to Digital Relaying," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 99, No. 5, September/October 1980, pp. 1918-1926.
- [6]. A.A. Girgis, "A New Kalman Filtering Based Digital Distance Relay," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 101, No. 9, September 1982, pp. 3471-3480.
- [7]. A.A. Girgis, "Application of Kalman Filtering in Computer Relaying of Power Systems, 'I Ph .D. Dissertation, Iowa State University, Ames, Iowa, May 1981.
- [8]. A.A. Girgis, Elham B. Makram, "Application of Adaptive Kalman Filtering in Fault Classification, Distance Protection, and Fault Location Using Microprocessors", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 1, February 1988.
- [9]. Y.H. Song, Q.Y. Xuan and .T. Johns, "Comparison Studies of Five Neural Network Based Fault Classifiers for Comlex Transmission Lines", IEEE 1996.
- [10]. P. Kumar, M. Jarnil, M. S. Thomas, Moinuddin, "Fuzzy Approach to Fault Classification for Transmission Line Protection", IEEE 1999.
- [11]. Omar A. S. Youssef, "Combined Fuzzy-Logic Wavelet-Based Fault Classification Technique for Power System Relaying", IEEE TRANS. on Poower Delivery, Vol. 19, No. 2, April 2004.
- [12]. S. Vasilic, M. Kezunovic, "Fuzzy ART Neural Network Algorithm for Classifying the Power System Faults", IEEE Transactions on Power Delivery, 2004.
- [13]. P. K. Dash, A. K. Pradhan, G. Panda, "A Novel Fuzzy Neural Network Based Distance Relaying