

روشی نوین مبتنی بر جریان حین خطا برای تشخیص جهت خطا در شبکه های توزیع برق با حضور منابع تولید پراکنده در مناطق نظامی

محمد رضا علیزاده پهلوانی*

دانشیار، مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

(دریافت: ۹۴/۰۹/۲۸، پذیرش: ۹۵/۰۱/۲۳)

چکیده

با گسترش نفوذ منابع تولید پراکنده در سطح شبکه های توزیع برق به ویژه مناطق نظامی، استفاده از رله های جهت یاب خطا به منظور رفع سریع عیب و بالا بردن قدرت پدافندی شبکه، به یک امر الزامی برای حفاظت این شبکه ها تبدیل شده است. با این وجود، استفاده از رله های جهت یاب متداول، برای تشخیص جهت خطا، در شبکه های توزیع، به دلیل عدم حضور ترانسفورماتور ولتاژ، امکان پذیر نیست. یک راه حل مناسب استفاده از جریان قبل از خطا، به جای استفاده از ولتاژ، به عنوان یک کمیت مرجع، برای تشخیص جهت خطا است. به هر حال، این روش به ولتاژ برای تشخیص جهت انتقال توان نیاز دارد. در مقاله حاضر، یک روش نوین برای تشخیص جهت خطا ارائه شده است. روش پیشنهادی قادر به تشخیص جهت خطا، تنها با استفاده از جریان حین خطا است و باعث بهبود عملکرد رله های جهت یاب مبتنی بر جریان شده است. با استفاده از روش حاضر می توان از هزینه ای اضافی به کاررفته برای ترانس ولتاژ و یا هزینه ای مربوط به انشعابات اضافی در طرح های حفاظتی متداول جلوگیری نمود. عملکرد روش پیشنهادی بر روی دو شبکه توزیع نمونه، شامل ۳ شین دو سو تغذیه و ۱۴ شین IEEE مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است. نتایج به دست آمده کارایی بالای روش پیشنهادی را تصدیق می کند.

کلید واژه ها: پدافند غیرعامل، تولید پراکنده، رله جهت یاب، شبکه توزیع، تخمین فازور.

A Novel Method Based on Through-Fault Current for Detection of Fault Direction in Power Distribution Systems in Military Areas

M. Alizadeh Pahlavani*

Malek Ashtar University of technology, Tehran, Iran,

(Received: 19/12/2015; Accepted: 11/04/2016)

Abstract

By increasing the penetration of distributed generation in electrical distribution networks, especially in military areas, use of directional relay becomes a necessary device for protection of these networks. Due to the absence of potential transformers, the conventional directional relays cannot be applied in distribution networks for detection of fault direction. For this purpose, a new directional relay is presented that is able to detect the fault direction using only the through-fault current. The proposed approach is not affected by power flow direction and improves the performance of the previously introduced current based on directional relays employing pre-fault current. The present approach could eliminate the cost of the potential transformer in distribution systems. The extensive simulations, under different operation condition are carried out on two different distribution systems; including bidirectional 3 bus network and IEEE 14 bus test system. The obtained results approved the high efficiency of the proposed method.

Keywords: Passive Defence, Distributed Generation, Directional Relay, Distribution Network, Phasor Estimation.

*Corresponding Author E-mail: Mr_Alizadehp@mut.ac.ir

۱. مقدمه

پدافند غیرعامل عبارت است از مجموعه اقدامات غیر مسلحانه‌ای که به کارگیری آن‌ها موجب افزایش بازدارندگی، کاهش آسیب پذیری، ارتقا پایداری ملی، تداوم فعالیت‌های ضروری و تسهیل مدیریت بحران در برابر تمهیدات و اقدامات نظامی دشمن می‌شود. یکی از اقداماتی که در زمان جنگ توسط دشمن انجام می‌شود، تخریب زیر ساخت‌های حیاتی و گسترده از جمله ایجاد اختلال در برق رسانی به محیط‌های حساس و مهم مانند سایت‌های استقراری نیروهای مسلح است. در نتیجه بروز خاموشی‌های گسترده و طولانی مدت در سایت‌های فرماندهی نیروهای مسلح، ارتباط یگان‌ها و عملیات لجستیکی و تدارکات مختل می‌شود. از سوی دیگر برای پادگان‌های دور افتاده مسئله تامین انرژی الکتریکی برای مصارف نظامی و یا رفاهی، حائز اهمیت است. بنابراین، استفاده از منابع تولید پراکنده برای پایگاه‌های نظامی حساس رواج یافته است تا اینکه بتوان تغذیه پایدار سایت‌های فوق را در شرایط بحران تضمین کرده و شاخص پدافند غیر عامل را افزایش داد. به طور نمونه ارتش آمریکا در افغانستان با مشکل تهجم القاعده به کاروان‌های سوخت‌رسانی برای پایگاه‌های خود مواجه شده که به منظور گذر از این بحران به سمت سایت‌های شامل منابع تولید پراکنده گام برداشته و در این زمینه سرمایه‌گذاری هنگفتی کرده است [۱-۲].

رله‌های حفاظتی خطوط انتقال و همچنین فیدرهای توزیع، باید قادر به تشخیص تمام‌انصال کوتاه‌های رویداده در داخل منطقه حفاظتی مربوط به خود باشند. این فرآیند در شبکه‌های شعاعی نسبتاً ساده‌تر است، زیرا جریان خط تنها در یک سمت شارش پیدا می‌کند. به‌هرحال، در شبکه‌های انتقال نیروی برق جریان خط توسط چندین منبع تغذیه‌شده و جهت آن به مکان خط بستگی دارد و ثابت نیست؛ بنابراین، رله‌های حفاظتی در خطوط انتقال به‌منظور تمایز بین خطاهای رویداده در جلوی رله (خطاهای مستقیم) و خطاهایی که مکان آن‌ها در پشت رله قرار دارد (خطاهای معکوس)، باید قادر به تشخیص جهت خط باشند.

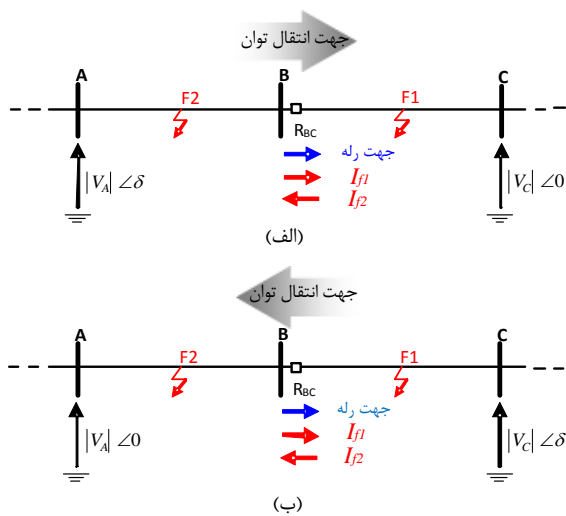
استفاده از رله‌های جهت‌یاب به خطوط انتقال محدود نمی‌شود. در سال‌های اخیر تمایل به استفاده از منابع تولید پراکنده به دلیل مزایای بی‌شمار در سطح شبکه توزیع به‌ویژه در مناطق نظامی افزایش چشمگیری پیدا کرده است [۳-۵]. تحت چنین شرایطی، شبکه توزیع متداول (پسیو) به یک شبکه اکتیو باقابلیت انتقال توان دو جهت تبدیل خواهد شد. بااین‌وجود، استفاده از رله‌های جریان زیاد غیر جهت‌یاب متداول، در

شبکه‌های توزیع کارایی خود را ازدست‌داده و در معرض عملکرد اشتباه قرار خواهند گرفت [۶ و ۷]. از طرف دیگر، هدف اصلی از کنترل و هدایت خودکار در شبکه‌های توزیع هوشمند، افزایش بهره‌وری و قابلیت اطمینان توان تحویل داده‌شده به مصرف‌کنندگان است [۸]؛ بنابراین استفاده از رله‌های جهت‌یاب در سطح شبکه‌های توزیع به یک امر الزامی تبدیل شده به‌نحوی که این رله‌ها نقشی اساسی را در اجرای طرح‌های حفاظتی باقابلیت اطمینان بالا در شبکه‌های توزیع هوشمند دارند [۹-۱۲].

رله‌های جهت‌یاب متداول، از ولتاژ به‌عنوان یک کمیت مرجع به‌منظور تشخیص جهت خطا استفاده می‌کنند. عملکرد این نوع از رله‌ها را می‌توان به سه دسته تقسیم نمود [۱۳]:
 ۱- پلاریزاسیون خودی (استفاده از ولتاژ هر فاز)؛ ۲- پلاریزاسیون متقاطع (استفاده از ولتاژ فازهای سالم)؛ ۳- پلاریزاسیون ولتاژ حافظه‌ای (استفاده از ولتاژ قبل از خطا). در منابع مختلف رله‌های جهت‌یاب سرعت بالایی بر اساس مؤلفه‌های تحمیلی خطا [۱۴ و ۱۵] و یا امواج گذرا [۱۶ و ۱۷] پیشنهاد شده است. تمام روش‌های ذکرشده به ولتاژ خط برای تشخیص جهت خطا نیاز دارند. به‌هرحال، هیچ‌کدام از این طرح‌ها به دلیل عدم حضور ترانس ولتاژ قابلیت پیاده‌سازی عملی در سطح شبکه‌های توزیع نیروی برق را ندارند. بنابراین تمایل به استفاده از رله‌های جهت‌یاب مبتنی بر جریان در شبکه‌های توزیع به یک موضوع برجسته در حفاظت این نوع از شبکه‌ها تبدیل شده است [۱۸-۲۳].

رله‌های جهت‌یاب متفاوتی در منابع مختلف پیشنهاد شده است که از جریان قبل از خطا برای تشخیص جهت خطا استفاده می‌کنند [۱۸-۲۳]. در روش‌های ارائه‌شده پیشین، از اختلاف‌فاز بین جریان حین خطا و جریان قبل از خطا به‌عنوان یک معیار برای تشخیص جهت خطا استفاده شده است. در این روش‌ها جریان توالی مثبت [۱۸] و یا جریان فاز [۲۱] برای تشخیص جهت خطا مورد استفاده قرار گرفته است.

روش‌های ارائه‌شده پیشین، به دلیل استفاده از جریان قبل از خطا، برای تشخیص جهت خطا، کارایی خود را در هنگام تغییر جهت انتقال توان از دست می‌دهند. به‌منظور عملکرد مطمئن روش‌های مذکور در تمامی شرایط بهره‌برداری، به ولتاژ خط برای تشخیص جهت انتقال توان نیاز است؛ بنابراین، استفاده از این روش‌ها در سیستم‌های توزیع نیروی برق به دلیل عدم وجود



شکل ۱. بررسی جریان حین خطا؛ (الف) جهت انتقال توان مستقیم (از A به C)، (ب) جهت انتقال توان معکوس (از C به A)

$$Z_{AF1} = |Z_{AF1}| \angle \theta_1 \quad (1)$$

$$Z_{CF2} = |Z_{CF2}| \angle \theta_2 \quad (2)$$

۱-۲. جهت انتقال توان مستقیم

چنانچه در شکل (۱-الف) نشان داده شده است، جهت انتقال توان مستقیم به این معنا است که جهت انتقال توان مشابه جهت قراردادی رله است. در چنین شرایطی امکان بروز خطاهای مستقیم و معکوس به صورت زیر مورد بررسی قرار گرفته است.

خطاهای مستقیم: با توجه به شکل (۱-الف)، جریان حین خطا را می توان برای خطاهای مستقیم به صورت زیر به دست آورد:

$$I_{\text{Through-fault}} = I_{F1} = \frac{|V_A| \angle \delta}{|Z_{AF1}| \angle \theta_1} = |I_{F1}| \angle (\delta - \theta_1) \quad (3)$$

مشتق مثبت I_{F1} با I'_{F1} به صورت زیر قابل بیان است:

$$+I'_{F1} = |I'_{F1}| \angle (\delta - \theta_1 + \pi/2) \quad (4)$$

مشتق منفی I_{F1} را با $-I'_{F1}$ نشان داده و به صورت زیر بیان می شود:

$$-I'_{F1} = |I'_{F1}| \angle (\delta - \theta_1 + 3\pi/2) = |I'_{F1}| \angle (\delta - \theta_1 - \pi/2) \quad (5)$$

در رابطه (۵)، زاویه فاز $-I'_{F1}$ به نحوی اصلاح شده است که در بازه $[-\pi, +\pi]$ قرار گیرد. در این مرحله یک فازور جدید به عنوان یک جریان مرجع تعریف شده است (I_{Ref}). این فازور برای تشخیص جهت خطا مورد استفاده قرار گرفته است. این جریان

ترانس ولتاژ هزینه زیادی را بر این شبکه ها تحمیل می کند و قابلیت پیاده سازی عملی را ندارند.

در مقاله حاضر، یک روش نوین برای تشخیص جهت خطا در شبکه های قدرت الکتریکی در مناطق نظامی ارائه شده است. روش حاضر مبتنی بر جریان حین خطا است؛ بنابراین، در مقایسه با روش های قبلی، در روش پیشنهادی حاضر، نیازی به استفاده از ولتاژ خط و یا جریان قبل از خطا برای تشخیص جهت خطا وجود ندارد. روش پیشنهادی حاضر با تغییر جهت انتقال توان تحت تأثیر قرار نخواهد گرفت. همان گونه که نشان داده خواهد شد، روش پیشنهادی باعث بهبود عملکرد رله های جهت یاب مبتنی بر جریان شده است.

۲. معرفی روش پیشنهادی

چنانچه ذکر شد، خصوصیت بارز رله جهت یاب پیشنهاد شده استفاده از جریان حین خطا^۱ برای تشخیص جهت خطا است. برای همین، در روش پیشنهادی مؤلفه های فرکانس اصلی جریان حین خطا و مشتقات مثبت و منفی آن محاسبه می شوند. این فرآیند با استفاده از روش های تخمین فازور^۲ متداول قابل انجام است.

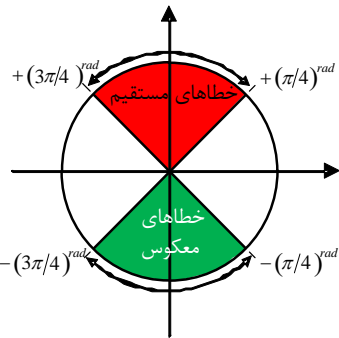
برای تمام فازورهای محاسبه شده، زوایای فاز متناظر باید در مقیاس $[-\pi, +\pi]$ بیان شود. به عبارت دیگر، در صورتی که زاویه فاز بزرگ تر و یا مساوی $+\pi$ باشد، باید آن را از $+2\pi$ کم کرد. از طرف دیگر، در صورتی که زاویه فاز کوچک تر از $-\pi$ باشد، باید زاویه را با $+2\pi$ جمع کرد. این فرض مهم در تمام روابط نوشته شده در ادامه مدنظر قرار گرفته است.

در این قسمت روش پیشنهادی با استفاده از سیستم نشان داده شده در شکل (۱) توضیح داده شده است. با توجه به جهت انتقال توان، جریان حین خطای اندازه گیری شده توسط رله R_{BC} برای خطاهای جلوی رله (مستقیم) و خطاهای پشت رله (معکوس) محاسبه شده است. با توجه به شکل (۱)، جهت قراردادی رله R_{BC} از شین B به سمت شین C در نظر گرفته شده است. در شکل (۱)، مکان خطاهای مستقیم با نماد $F1$ و مکان خطاهای معکوس با نماد $F2$ مشخص شده است. فرض بر این است که امپدانس بین نقاط A و $F1$ ، Z_{AF1} و امپدانس بین نقاط C و $F2$ برابر Z_{CF2} است. امپدانس های Z_{AF1} و Z_{CF2} را می توان به صورت شکل (۱) تعریف کرد:

¹Through Fault Current
² Phasor Estimation

می شود. به منظور افزایش قابلیت اطمینان این معیار، دو ناحیه متقارن از یک دایره را می توان به عنوان نواحی عملکرد طرح پیشنهادی در نظر گرفت. این نواحی در شکل (۲) نشان داده شده است؛ بنابراین معیار نهایی برای تشخیص جهت خطا را می توان به صورت زیر تعریف نمود:

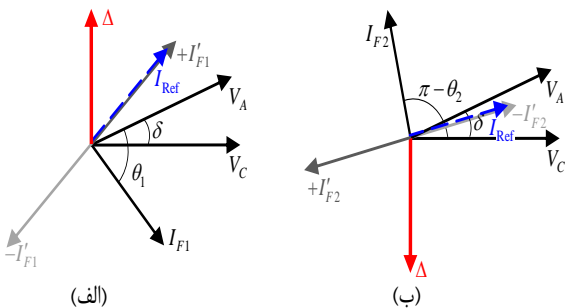
$$\begin{cases} +(\pi/4)^{rad} < (\angle\Delta) < +(3\pi/4)^{rad} \Rightarrow \text{Forward} \\ -(\pi/4)^{rad} < (\angle\Delta) < -(3\pi/4)^{rad} \Rightarrow \text{Reverse} \end{cases} \quad (14)$$



شکل ۲. نواحی عملکرد رله پیشنهادی

زوایای فاز جریان مرجع در رابطه های (۶) و (۱۰) به صورت $(\angle(+I'_{Through-fault}) + \angle(-I'_{Through-fault}))/2$ به اضافه $\pi/2$ تعریف شد. در این تعریف عبارت $\pi/2$ به این دلیل اضافه شده است تا قسمت های بالایی و پایینی دایره، نشان دهنده خطاهای مستقیم و یا معکوس باشند (چنانچه در شکل (۲) نشان داده شده است). نواحی عملکرد روش پیشنهادی نشان داده شده در شکل (۲) را می توان با تغییر عبارت $\pi/2$ به یک مقدار دلخواه، در یک ناحیه دیگر قرارداد (ناحیه عملکرد رله را عوض نمود).

دیگرام فازوری مربوط به شکل (۱-الف) برای هر دو خطای مستقیم و معکوس در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۳)، اگرچه جریان های بعد از خطا برای خطاهای مستقیم و معکوس 180° با یکدیگر اختلاف فاز دارند، به هر حال جریان های مرجع متناظر با آن ها (I_{Ref}) تقریباً هم فاز می باشند. این وضعیت ناشی از این واقعیت است که زوایای فاز در مقیاس $(-\pi, +\pi)$ بیان شده اند.



شکل ۳. دیگرام فازوری مربوط به شکل (الف-۱)؛ (الف) خطاهای مستقیم، (ب) خطاهای معکوس

مرجع به صورت زیر قابل بیان است:

$$\begin{aligned} I_{Ref} &= |I_{F1}| \angle \left(\frac{\angle(+I'_{F1}) + \angle(-I'_{F1}) + \pi}{2} \right) \\ &= |I_{F1}| \angle \left(\delta - \theta_1 + \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

خطاهای معکوس: برای خطاهای معکوس، با در نظر گرفتن جهت اختیاری رله نشان داده در شکل (۱-ب)، می توان رابطه (۷) را نوشت:

$$I_{Through-fault} = I_{F2} = -\frac{|V_C| \angle 0}{|Z_{CF2}| \angle \theta_2} = |I_{F2}| \angle (-\theta_2 + \pi) \quad (7)$$

مشتقات مثبت و منفی I_{F2} را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$+I'_{F2} = |I'_{F2}| \angle (-\theta_2 + 3\pi/2) = |I'_{F2}| \angle (-\theta_2 - \pi/2) \quad (8)$$

$$-I'_{F2} = |I'_{F2}| \angle (-\theta_2 + \pi/2) \quad (9)$$

مشابه با رابطه (۶)، جریان مرجع را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} I_{Ref} &= |I_{F2}| \angle \left(\frac{\angle(+I'_{F2}) + \angle(-I'_{F2}) + \pi}{2} \right) \\ &= |I_{F2}| \angle \left(-\theta_2 + \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

تا این مرحله، جریان های بعد از خطا و جریان های مرجع برای خطاهای مستقیم و معکوس محاسبه شد؛ بنابراین، جهت خطا را می توان با استفاده از یک فازور جدید (Δ) به دست آورد. فازور Δ به صورت زیر قابل بیان است:

$$\Delta = |I_{Post-fault}| \angle (\angle I_{Ref} - \angle I_{Post-fault}) \quad (11)$$

برای خطاهای مستقیم با قرار دادن (۳) و (۶) در (۱۱) رابطه زیر به دست خواهد آمد:

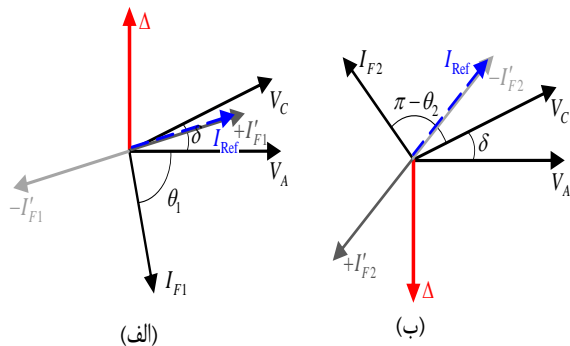
$$\Delta_{Forward} = |I_{F1}| \angle (+\pi/2) \quad (12)$$

برای خطاهای معکوس، با توجه به (۷)، (۱۰) و (۱۱) رابطه زیر را می توان نوشت:

$$\Delta_{Reverse} = |I_{F2}| \angle (-\pi/2) \quad (13)$$

با مقایسه روابط (۱۲) و (۱۳) مشخص است که 180° یا (π^{rad}) اختلاف فاز بین زوایای فاز Δ برای خطاهای مستقیم و معکوس وجود دارد. این اختلاف فاز قابل توجه، زاویه فاز Δ را قادر می سازد که به عنوان یک معیار مناسب برای تمایز بین خطاهای مستقیم و معکوس استفاده شود؛ بنابراین، اگر زاویه فاز Δ برابر $(\pi/2)^{rad} +$ باشد، خطا مستقیم تشخیص داده شده و اگر زاویه فاز Δ برابر $(-\pi/2)^{rad}$ باشد، خطا معکوس تشخیص داده

صادق است؛ بنابراین، معیار قبلی توصیف شده برای جهت انتقال توان مستقیم (روابط (۱۱)، (۱۲) و (۱۳))، برای جهت انتقال توان معکوس نیز صادق است. به عبارت بهتر، زاویه فاز Δ تعریف شده در (۱۱) با تغییر جهت انتقال توان تحت تأثیر قرار نخواهد گرفت؛ بنابراین، زاویه فاز Δ را می توان به عنوان کمیت قابل قبول برای ایجاد تمایز بین خطاهای مستقیم و معکوس، مستقل از جهت انتقال توان به کاربرد. دیاگرام فازوری شکل (۱-ب) در شکل (۴) نشان داده شده است. همان طور که در این شکل نشان داده شده است، فازورهای Δ برای خطاهای مستقیم و خطاهای معکوس (در هنگام جهت انتقال توان معکوس) مشابه شکل (۳) (برای جهت انتقال توان مستقیم) می باشند.



شکل ۴. دیاگرام فازوری مربوط به شکل (۱-ب)؛ (الف) خطاهای مستقیم، (ب) خطاهای معکوس

۳-۲. الگوریتم روش پیشنهادی

روش پیشنهادی را می توان به راحتی در رله های میکروپروسسوری^۱ (ریزپردازنده) اجرا کرد. چنانچه در قسمت قبل نشان داده شد، طرح پیشنهادی فقط از جریان حین خطا، برای تشخیص جهت خطا استفاده می کند و به ولتاژ و یا جریان قبل از خطا برای تشخیص جهت خطا نیازی ندارد. الگوریتم رله جهت یاب پیشنهادی در شکل (۵) نشان داده شده است. این الگوریتم تنها برای فاز A نمایش داده شده است. الگوریتم مشابهی برای فازهای B و C اجرا شده است. تعاریف زیر باید در الگوریتم نشان داده شده در شکل (۵) در نظر گرفت:

قبل از تشخیص جهت خطا، لازم است که وقوع خطا تشخیص داده شود. برای همین، شرایط زیر باید مورد بررسی قرار گیرد [۲۴]:

$$\|i_a[k] - i_a[k-N]\| - \|i_a[k-N] - i_a[k-2N]\| \geq 0.2I_n \quad (23)$$

در رابطه (۲۳)، k شماره نمونه، N نرخ نمونه برداری و I_n جریان نامی است. مشتقات مثبت و منفی جریان حین خطا را می توان

۲-۲. جهت انتقال توان معکوس

این وضعیت در شکل (۱-ب) که جهت انتقال توان از شین C به سمت شین A هست، نشان داده شده است. مشابه قبل، خطاهای مستقیم و معکوس به صورت زیر مورد بررسی قرار گرفته است.

خطاهای مستقیم: برای خطاهای مستقیم با توجه به شکل (۱-ب) رابطه زیر را داریم:

$$I_{\text{Through-fault}} = I_{F1} = \frac{|V_A| \angle 0}{|Z_{AF1}| \angle \theta_1} = |I_{F1}| \angle (-\theta_1) \quad (15)$$

مشتقات مثبت و منفی جریان I_{F1} را می توان به صورت زیر به دست آورد:

$$+I'_{F1} = |I'_{F1}| \angle (-\theta_1 + \pi/2) \quad (16)$$

$$-I'_{F1} = |I'_{F1}| \angle (-\theta_1 + 3\pi/2) = |I'_{F1}| \angle (-\theta_1 - \pi/2) \quad (17)$$

جریان مرجع را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$I_{\text{Ref}} = |I_{F1}| \angle \left(\frac{\angle(+I'_{F1}) + \angle(-I'_{F1})}{2} + \frac{\pi}{2} \right) \\ = |I_{F1}| \angle \left(-\theta_1 + \frac{\pi}{2} \right) \quad (18)$$

خطاهای معکوس: در این وضعیت با در نظر گرفتن جهت قراردادی رله در شکل (۱-ب)، جریان حین خطا را می توان به صورت زیر نوشت:

$$I_{\text{Through-fault}} = I_{F2} = -\frac{|V_C| \angle \delta}{|Z_{CF2}| \angle \theta_2} \\ = |I_{F2}| \angle (\delta - \theta_2 + \pi) \quad (19)$$

به طور مشابه مشتقات مثبت و منفی جریان I_{F2} و جریان مرجع را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$+I'_{F2} = |I_{F2}| \angle (\delta - \theta_2 + 3\pi/2) = |I_{F2}| \angle (\delta - \theta_2 - \pi/2) \quad (20)$$

$$-I'_{F2} = |I_{F2}| \angle (\delta - \theta_2 + \pi/2) \quad (21)$$

$$I_{\text{Ref}} = |I_{F2}| \angle \left(\frac{\angle(+I'_{F2}) + \angle(-I'_{F2})}{2} + \frac{\pi}{2} \right) \\ = |I_{F2}| \angle (\delta - \theta_2 + \frac{\pi}{2}) \quad (22)$$

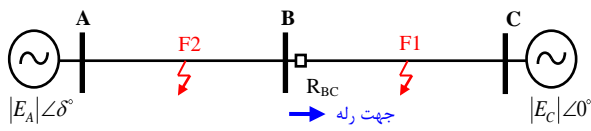
با قرار دادن (۱۵) و (۱۸) روابط محاسبه شده برای جهت انتقال توان معکوس) در (۱۱) رابطه ای مشابه با (۱۲) (زاویه فاز Δ مربوط به جهت انتقال توان مستقیم) را می توان به دست آورد. به طور مشابه، با توجه به روابط (۱۹)، (۲۲) و (۱۱)، رابطه (۱۳) در شرایط جهت انتقال توان معکوس، برای خطاهای معکوس نیز

¹ Microprocessor

عملکرد روش پیشنهادی برای انواع خطاهای تک فاز به زمین (فاز A به زمین)، دو فاز به زمین (فازهای A و B به زمین) و سه فاز به زمین (فازهای ABC به زمین) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مربوطه در ادامه ارائه شده است.

۳-۱. سیستم شبیه‌سازی شده اول

سیستم شبیه‌سازی شده اول، یک سیستم ۳۳ کیلوولت سه شین است. این سیستم در شکل (۶) نشان داده شده است. پارامترهای این سیستم نیز در جدول ۱ مرجع [۲۷] ارائه شده است. منبع A نشان داده شده در شکل (۶) معادل یک شبکه قدرت است. منبع C نیز مدار معادل یک ریز شبکه است. در مرجع [۲۷]، عملکرد رله R_{BC} نشان داده شده در شکل (۶) در برابر جهت انتقال توان، مقاومت خطا و لحظه‌ی رخداد خطا مورد ارزیابی قرار گرفته است. قابل ذکر است که در شبیه‌سازی‌های مربوط به این قسمت، خطاهای F1 و F2 در وسط خطوط AB و BC به سیستم مورد نظر اعمال شده است.



شکل ۶. سیستم شبیه‌سازی شده اول

۳-۲. سیستم شبیه‌سازی شده دوم

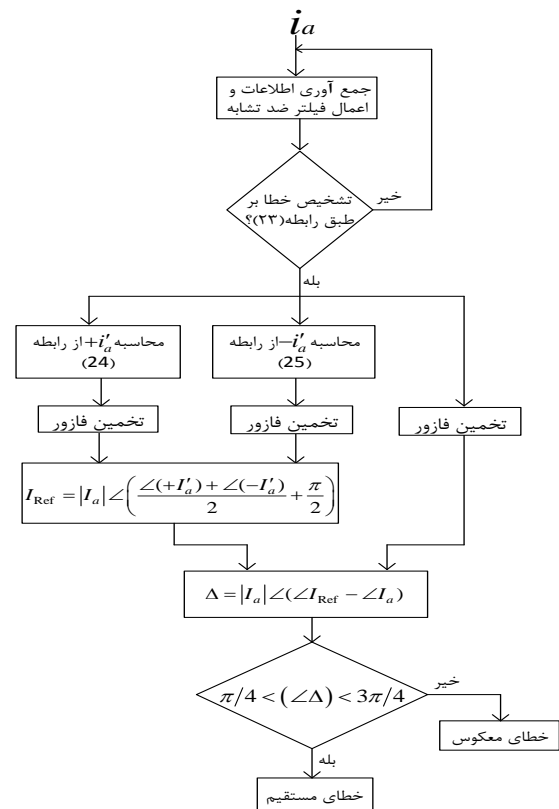
به منظور اثبات کارایی مشخصه‌ی رله پیشنهادی تحت شرایط بهره‌برداری مختلف در یک سیستم قدرت، در این قسمت مشخصه روش پیشنهادی بر روی یک شبکه توزیع حلقوی مورد بررسی قرار گرفته است. دیاگرام تک‌خطی این شبکه در شکل (۷) نشان داده شده است. اطلاعات سیستم مورد مطالعه در [۲۸] موجود است. با توجه به شکل (۷)، منابع DG به تمام شین‌های سیستم متصل شده است. منابع DG از نوع ژنراتور سنکرون بوده که از طریق ترانسفورماتور افزایشدهنده ($\Delta-Y$) به شبکه متصل شده‌اند. در این شبکه از ۱۶ رله جریان زیاد جهت‌یاب (یک جفت بر روی هر خط) برای حفاظت سیستم در برابر انواع خطاهای مختلف استفاده شده است. به منظور جلوگیری از افزایش حجم محاسبات در این قسمت پنج نقطه دلخواه به منظور اعمال خطا در نظر گرفته شده است. نمادهای F1 تا F5 مکان‌های در نظر گرفته شده برای اعمال خطا در شبکه را نشان می‌دهند. شبیه‌سازی‌های گسترده‌ای، تحت شرایط بهره‌برداری متفاوت اجرا شده است، نتایج مربوطه در جدول (۱) ارائه شده است.

به صورت زیر به دست آورد [۲۵]:

$$+i'_a[k] = \frac{1}{2\omega\Delta T} (i_a[k+1] - i_a[k-1]) \quad (24)$$

$$-i'_a[k] = \frac{1}{2\omega\Delta T} (i_a[k-1] - i_a[k+1]) \quad (25)$$

که در این روابط، $\omega = 2\pi f$ ، $\Delta T = 1/(N \times f)$ و f فرکانس سیستم قدرت است. فرآیند تخمین فازور را می‌توان با استفاده از تبدیل فوریه گسسته^۱ تمام سیکل انجام داد [۲۶]. موضوع مهمی که باید در این فرآیند مدنظر قرار گیرد، بیان تمام زوایای فاز در مقیاس $[-\pi, +\pi]$ است.



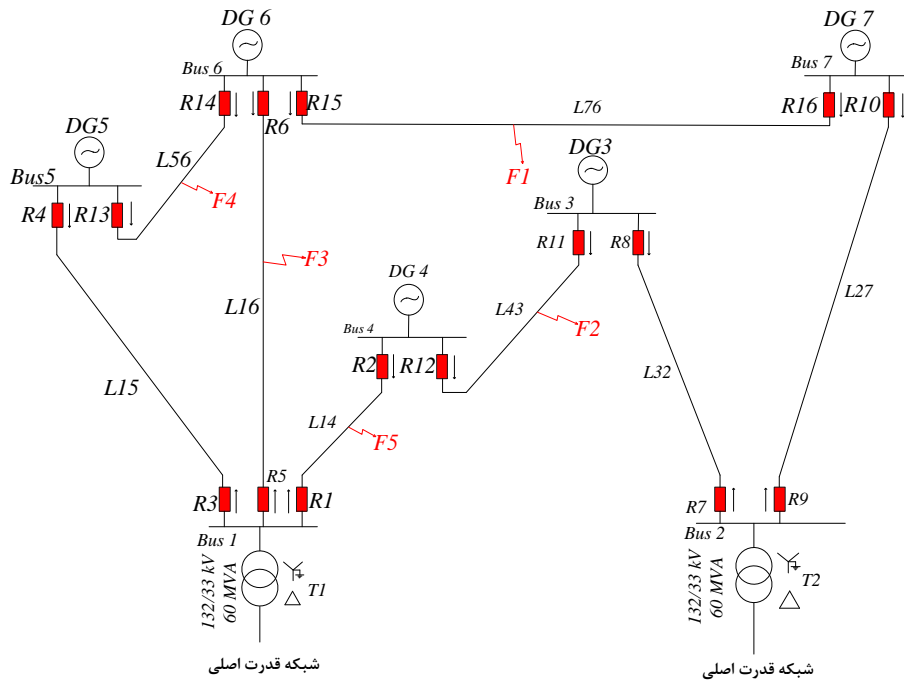
شکل ۵. فلوجارت روش پیشنهادی برای فاز A (الگوریتم مشابهی در فازهای B و C اجرا شده است)

۳. نتایج شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای و بحث‌های مرتبط

در این قسمت روش پیشنهادی بر روی دو سیستم آزمایشی مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی سیستم‌های مورد مطالعه از نرم‌افزار PSCAD/EMTDC استفاده شده است. برای اجرای الگوریتم روش پیشنهادی، جریان اندازه‌گیری شده در محل رله، به عنوان داده ورودی برای کد MATLAB مورد استفاده قرار گرفته است. در تمام شبیه‌سازی‌ها فرکانس نمونه‌برداری^۲ برابر ۱ کیلوهرتز در نظر گرفته شده است.

^۱Discrete Fourier Transform

^۲Sampling Frequency



شکل ۷. سیستم شبیه‌سازی شده دوم

جدول ۱. بررسی عملکرد رله پیشنهادی برای مکان‌های خطا در نظر گرفته‌شده در سیستم شبیه‌سازی دوم

نوع خطا	مکان خطا	شماره رله	Φ_I (رادیان)	Φ_{Ref} (رادیان)	Φ_{Δ} (رادیان)	جهت خطا	نوع خطا	مکان خطا	شماره رله	Φ_I (رادیان)	Φ_{Ref} (رادیان)	Φ_{Δ} (رادیان)	جهت خطا
تکرار به زمین	F1	R15	-۰/۳۷	۱/۲۰	+۱/۵۷	مستقیم	تکرار به زمین	F1	R15	-۰/۴	۱/۱۷	+۱/۵۷	مستقیم
		R16	-۰/۱۸	۱/۷۵	+۱/۵۷	مستقیم			R16	۰/۴۲	۱/۹۹	+۱/۵۷	مستقیم
		R6	۲/۸۱	۱/۲۴	-۱/۵۷	معکوس			R10	-۲/۳۱	۲/۴۰	-۱/۵۷	معکوس
		R14	۲/۶۴	۱/۰۷	-۱/۵۷	معکوس			R14	۲/۷۱	۱/۱۴	-۱/۵۷	معکوس
		R10	-۲/۴۸	۲/۲۳	-۱/۵۷	معکوس			R6	-۲/۵۱	۲/۲۰	-۱/۵۷	معکوس
	F2	R11	-۰/۱۱	۱/۶۸	+۱/۵۷	مستقیم	F3	R5	-۰/۱۴	۱/۴۳	+۱/۵۷	مستقیم	
		R12	-۰/۲۹	۱/۲۸	+۱/۵۷	مستقیم		R6	۰/۰۸	۱/۶۵	+۱/۵۷	مستقیم	
		R2	۲/۹۳	۱/۳۵	-۱/۵۷	معکوس		R1	۲/۹۹	۱/۴۲	-۱/۵۷	معکوس	
	F4	R8	-۳/۰۴	۱/۶۷	-۱/۵۷	معکوس	F5	R3	-۲/۹۴	۱/۷۷	-۱/۵۷	معکوس	
		R13	-۰/۴۰	۱/۱۷	+۱/۵۷	مستقیم		R14	۲/۴۵	۰/۸۸	-۱/۵۷	معکوس	
		R14	-۰/۲۳	۱/۸۰	+۱/۵۷	مستقیم		R15	-۲/۶۲	۲/۰۹	-۱/۵۷	معکوس	
		R4	۲/۶۴	۱/۰۷	-۱/۵۷	مستقیم		R1	-۰/۰۹	۱/۴۸	+۱/۵۷	مستقیم	
	F5	R6	-۲/۹۳	۱/۷۸	-۱/۵۷	معکوس	F2	R2	-۰/۶۳	۰/۹۴	+۱/۵۷	مستقیم	
		R15	-۲/۸۹	۱/۸۲	-۱/۵۷	معکوس		R5	۲/۸۰	۱/۲۳	-۱/۵۷	معکوس	
		R1	-۰/۷۵	۰/۸۲	+۱/۵۷	مستقیم		R12	۲/۸۴	۱/۲۷	-۱/۵۷	معکوس	
R2		-۰/۸۵	۰/۷۲	+۱/۵۷	مستقیم	R3		۲/۹۷	۱/۴۰	-۱/۵۷	معکوس		
R5		۲/۲۹	۰/۷۲	-۱/۵۷	معکوس	R11		-۰/۲۳	۱/۳۴	+۱/۵۷	مستقیم		
تکرار به زمین	F1	R3	۲/۴۹	۰/۹۲	-۱/۵۷	معکوس	F3	R12	-۰/۳۸	۱/۱۹	+۱/۵۷	مستقیم	
		R12	۲/۰۰	۰/۴۳	-۱/۵۷	معکوس		R2	۲/۸۰	۱/۲۳	-۱/۵۷	معکوس	
		R15	-۰/۴۸	۱/۰۹	+۱/۵۷	مستقیم		R8	۲/۹۴	۱/۳۷	-۱/۵۷	معکوس	
	R16	-۰/۱۷	۱/۷۴	+۱/۵۷	مستقیم	F3	R5	۰/۵۲	۲/۰۹	+۱/۵۷	مستقیم		
	R10	-۲/۹۲	۱/۷۹	-۱/۵۷	معکوس		R6	۰/۴۸	۲/۰۵	+۱/۵۷	مستقیم		
	R14	۲/۷۹	۱/۲۲	-۱/۵۷	معکوس		R1	۲/۹۶	۱/۳۹	-۱/۵۷	معکوس		
	R6	۲/۹۷	۱/۴۰	-۱/۵۷	معکوس		R3	۲/۸۳	۱/۲۶	-۱/۵۷	معکوس		
	-	-	-	-	-		R14	۲/۸۲	۱/۲۵	-۱/۵۷	معکوس		
-	-	-	-	-	R15	-۲/۲۵	۲/۴۶	-۱/۵۷	معکوس				

۴. نتیجه گیری

در این مقاله یک روش نوین برای تشخیص جهت خطا در شبکه های توزیع دارای واحدهای تولید پراکنده در مناطق نظامی معرفی شد. روش پیشنهادی تنها از جریان حین خطا برای تشخیص جهت استفاده می کند؛ بنابراین، نسبت به دیگر رله های جهت یاب که نیازمند ولتاژ و جریان قبل از خطا به منظور تشخیص جهت خطا هستند، کارآمدتر است. در ضمن، روش پیشنهادی دارای مشخصه ای مطمئن در شرایط مختلف بهره برداری است. مشخصه روش پیشنهادی حاضر در برابر تغییر جهت انتقال توان، مقاومت خطا و لحظه وقوع خطا مورد بررسی قرار گرفت. شبیه سازی های گسترده ای در سطح شبکه ای توزیع شامل منابع تولید پراکنده اجرا شد. نتایج شبیه سازی ها کارایی بالای روش پیشنهادی را تأیید کرد؛ بنابراین، روش پیشنهادی باعث بهبود عملکرد رله های جهت یاب مبتنی بر جریان شده است.

۵. مراجع

- [11] Khederzadeh, M. "Wide-Area Protection in Smart Grids"; Proc. Int. Conf. Developments in Power Syst. Protection 2012, 1-4.
- [12] Eissa, M. M. "Protection Technique for Complex Distribution Smart Grid Using Wireless Token Ring Protocol"; IEEE Trans. Smart Grid 2012, 3, 1106-1118.
- [13] Ziegler, G. "Numerical Distance Protection; Principles and Applications"; Erlangen, Germany: Publicit, 2006.
- [14] Hashemi, S. M.; Tarafdar Hagh, M.; Seyedi, H. "Transmission-Line Protection: A Directional Comparison Scheme Using the Average of Superimposed Components"; IEEE Trans. Power Del. 2013, 28, 955-964.
- [15] Jafarian, P.; Sanaye-Pasand, M. "High-Speed Superimposed-Based Protection of Series-Compensated Transmission Lines"; IET Gen. Transm. Distrib. 2011, 5, 1290-1300.
- [16] Chen, W.; Malik, O. P.; Yin, X.; Chen, D.; Zhang, Z. "Study of Wavelet-Based Ultra High Speed Directional Transmission Line Protection"; IEEE Trans. Power Del. 2003, 18, 1134-1139.
- [17] Aguilera, C.; Orduña, E.; Rattá, G. "Directional Traveling-Wave Protection Based on Slope Change Analysis"; IEEE Trans. Power Del. 2007, 22, 2025-2033.
- [18] Pradhan, A. K.; Routray, A.; Madhan, G. S. "Fault Direction Estimation in Radial Distribution System Using Phase Change in Sequence Current"; IEEE Trans. Power Del. 2007, 22, 2065-2071.
- [19] Eissa, M. M.; Mahfouz, M. M. A. "New High-Voltage Directional and Phase Selection Protection Technique Based on Real Power System Data"; IET Gen. Transm. Distrib. 2012, 6, 1075-1085.
- [20] Ukil, A.; Deck, B.; Shah, V. H. "Current-Only Directional Overcurrent Protection for Distribution Automation: Challenges and Solutions"; IEEE Trans. Smart Grid 2012, 3, 1687-1694.
- [21] Ukil, A.; Deck, B.; Shah, V. H. "Smart Distribution Protection Using Current-Only Directional Overcurrent Relay"; Proc. IEEE Int. Conf. Innovative Smart Grid Technologies 2011, 1-7.
- [22] Pintos, L. M.; Moreto, M.; Rolim, J. G. "Applicability Analysis of Directional Overcurrent Relay without Voltage Reference in Microgrids"; IEEE Latin America Trans. 2016, 14, 687-693.
- [23] Trung, D. L.; Marc, P. "Directional Relays without Voltage Sensors for Distribution Networks"; IET Gen. Transm. Distrib. 2014, 8, 2074-2082.
- [24] Gao, H.; Crossley, P. A. "Design and Evaluation of A Directional Algorithm for Transmission-Line Protection Based on Positive Sequence Fault Components"; IEE Proc. Gen. Transm. Distrib. 2006, 153, 711-718.
- [25] Eissa, M. M. "Development and Investigation of a New High-Speed Directional Relay Using Field Data"; IEEE Trans. Power Del. 2008, 23, 1302-1309.
- [26] Phadke, A. G.; Thorp, J. S. "Synchronized Phasor Measurements and Their Applications"; New York: Springer, 2008.
- [27] Sidhu, T. S.; Singh, H.; Sachdev, M. S. "Design, Implementation and Testing of an Artificial Neural Network Based Fault Direction Discriminator for Protecting Transmission Lines"; IEEE Trans. Power Del. 1995, 10, 697-706.
- [28] Online Available at: <http://www.ee.washington.edu/research/pst-Ca.html>, 2005.
- [1] Aalami, H. A. "Quick and Accurate Fault Location in Power Distribution Systems in the Presence of DG Units in Military Areas"; Advanced Defence Sci. & Tech. 2015, 1, 9-18.
- [2] Amooshahi, H., Aalami, H. A. "Online Smart Load Shedding in Micro Grid in Presence of Wind Turbine"; Advanced Defence Sci. & Tech. 2014, 5, 159-166.
- [3] Joshua M. P. "Photovoltaics-A Path to Sustainable Futures"; Futures 2002, 34, 663-674.
- [4] Jason S. "The SPIDERS Project-Smart Power Infrastructure Demonstration for Energy Reliability and Security at US Military Facilities"; Proc. IEEE PES, Innovative Smart Grid Technologies 2012, 1.
- [5] Pepermansa, G.; Driesenb, J.; Haeseldonckxc, D.; Belmansc, R.; Haeseleer, W. "Distributed Generation: Definition, Benefits and Issues"; Energy Policy 2005, 33, 787-798.
- [6] Ituzaro, F. A.; Douglin, R. H.; Butler-Purry, K. L. "Zonal Overcurrent Protection for Smart Radial Distribution Systems with Distributed Generation"; Proc. IEEE Int. Conf. Innovative Smart Grid Technologies 2013, 1-6.
- [7] Oudalov, A.; Fidigatti, A. "Adaptive Network Protection in Microgrids"; <http://www.microgrids.eu/documents/519.pdf>, 2009.
- [8] Kazemi, S. "Reliability Evaluation of Smart Distribution Grids"; Ph.D. Thesis, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, 2011.
- [9] Zamani, M. A.; Yazdani, A.; Sidhu, T. S. "A Communication-Assisted Protection Strategy for Inverter-Based Medium-Voltage Microgrids"; IEEE Trans. Smart Grid. 2012, 3, 2088-2099.
- [10] Mahat, P.; Chen, Z.; Bak-Jensen, B.; Bak, C. L. "A Simple Adaptive Overcurrent Protection of Distribution Systems with Distributed Generation"; IEEE Trans. Smart Grid 2011, 2, 428-437.