

# روشی نوین جهت تشخیص خطای خط به زمین در ریزشبه‌های جریان مستقیم با استفاده از تغییرات توان لحظه‌ای

سعید عباسی و نوید غفارزاده

دارد که راه حل برطرف کردن آن معمولاً تعویض خود کانورتر می‌باشد. خطای خط به زمین رایج‌ترین نوع خطا است که در ریزشبه‌های DC رخ می‌دهد. در این نوع خطا، یکی از خطاهای انتقال دچار پارگی شده و توسط یک مقاومت خطا و یا بدون آن به زمین متصل می‌گردد. این نوع خطا سبب آسیب‌رسیدن به کانورترها شده و باعث ایجاد استرس‌های شدیدی در ریزشبه‌های DC می‌گردد [۷]. برای حفاظت ریزشبه‌های DC در برابر این نوع خطا طرح‌های حفاظتی مختلفی ارائه گردیده است. در [۸] نویسندگان یک طرح حفاظت دیفرانسیلی را برای تشخیص خطا در ریزشبه DC ارائه نموده‌اند. در این طرح به علت وجود خطا ارتباطی، قابلیت اطمینان آن پایین بوده و همچنین باعث به وجود آمدن مسایل همسان‌سازی اطلاعات رله‌های مختلف می‌شود. بالابودن هزینه‌های ناشی از خطوط ارتباطی یکی دیگر از مشکلات این طرح حفاظتی می‌باشد. در [۹] و [۱۰] طرح‌های حفاظتی واحد و غیر واحد برای ریزشبه DC مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده که نرخ تغییر جریان در این ریزشبه‌ها بالا بوده و طرح‌های حفاظتی پیشنهادی باید از سرعت و عملکرد بالایی برخوردار باشند تا از آسیب‌رسیدن به دستگاه‌های الکترونیک قدرت جلوگیری شود. نویسندگان در [۱۱] تشخیص خطا با استفاده از مشتق جریان و مبتنی بر نرخ تغییرات جریان در یک ریزشبه DC حلقوی شکل را معرفی کرده‌اند. در این روش میزان تغییرات جریان  $(di/dt)$  برای هر ناحیه اندازه‌گیری می‌شود و بیشترین مقدار  $di/dt$  برای ردیابی و ایزوله کردن خطا مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تکنیک را می‌توان برای تشخیص خطا مورد استفاده قرار داد اما مکان خطا را نمی‌توان به طور دقیق در این روش تشخیص داد و به ماژول ارتباطی نیاز دارد. در [۱۲] نیز یک طرح حفاظت غیر واحد معرفی گردیده که در آن تشخیص خطا به دقت و با سرعت بالایی انجام می‌شود. در این روش بعد از تشخیص خطا برای پاکسازی خطا، تمامی کانورترها از قسمت AC جدا و ریزشبه خاموش می‌گردد. روش حفاظت مبتنی بر پیش‌بینی ولتاژ برای ریزشبه‌های DC حلقوی ارائه شده است [۱۳]. در این روش، ولتاژ در نقطه رله با استفاده از یک مدل ریاضی توسعه یافته با ماتریس وندرموند پیش‌بینی می‌شود و سپس تشخیص خطا و ایزوله کردن آن با پیدا کردن تفاوت بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده انجام می‌گردد. به دلیل رفتار ولتاژ درجه دوم پیش‌بینی شده، تفاوت زیادی بین مقادیر ولتاژ اندازه‌گیری شده و ولتاژ پیش‌بینی شده در طول زمان خطا وجود دارد. رفتار درجه دوم ولتاژ وابسته به پارامترهای خطا و فاصله خطا می‌باشد به گونه‌ای که هرچه فاصله خطا بیشتر باشد، این روش خطا را بهتر تشخیص می‌دهد، اما برای خطاهای با فاصله کم قادر به تشخیص آنها نیست. در [۱۴] برای ریزشبه‌های DC حلقوی شکل روشی برای حفاظت از این نوع ریزشبه‌ها ارائه گشته که ولتاژ و حالت پایدار سیستم را از تغییرات مقاومت خطا مصون می‌دارد. در [۱۵] یک طرح حفاظتی غیر واحد بررسی شده که با استفاده از مشتقات مرتبه اول و دوم جریان، خطا را تشخیص

چکیده: با گسترش بارهای حساس همانند مراکز داده، استفاده از ریزشبه‌های DC افزایش یافته است. خطای خط به زمین رایج‌ترین نوع خطا در این نوع ریزشبه‌هاست که سبب خسارت‌های مختلفی به ریزشبه DC می‌گردد. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در بهره‌برداری از ریزشبه DC، نبود حفاظت مؤثر در برابر این نوع از خطا است. در این مقاله با استفاده از اندازه‌گیری‌های محلی همانند ولتاژ و جریان در ابتدای هر خط به بررسی تغییرات توان لحظه‌ای در آنها پرداخته و یک طرح حفاظتی نوین که مبتنی بر هیچ گونه خط ارتباطی نیست، ارائه می‌شود. طرح حفاظتی پیشنهادی از دقت و سرعت عملکرد خوبی برخوردار بوده و قادر است خطای خط به زمین را در ریزشبه جریان مستقیم با سرعت بالایی تشخیص دهد. صحت و دقت طرح حفاظتی در شرایط مختلف مورد آزمایش قرار گرفته است.

**کلیدواژه:** ریزشبه DC، حفاظت غیر- واحد، خطای خط به زمین، تغییرات توان لحظه‌ای، تشخیص خطا.

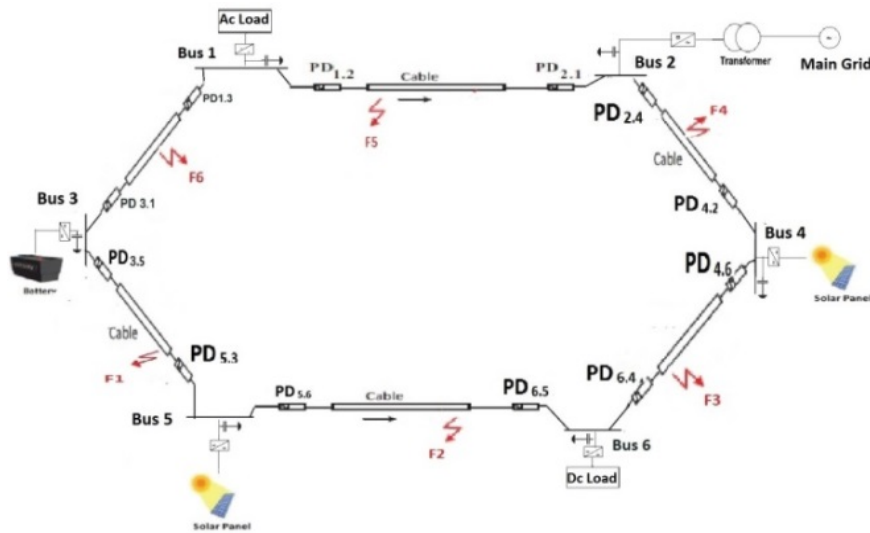
## ۱- مقدمه

استفاده زیاد از سوخت‌های فسیلی سبب افزایش گرمای جهانی شده و در چند وقت اخیر سرمایه‌گذاری دولت‌ها در منابع انرژی‌های تجدیدپذیر گسترش یافته است. از جمله راه‌های بهره‌برداری از این نوع منابع، استفاده از ریزشبه‌ها می‌باشد. ریزشبه‌ها مجموعه‌ای از منابع تولید پراکنده هستند که می‌توانند به طور کامل یا بخشی از بارهای مصرفی نزدیک خود را در حالت جدا از شبکه و یا متصل به آن تأمین کنند [۱]. ریزشبه‌ها بسته به نوع ولتاژ کاری خود به صورت جریان متناوب یا جریان مستقیم می‌باشند. با پیشرفت الکترونیک قدرت، اتصال منابع در ریزشبه‌های DC راحت‌تر انجام می‌پذیرد [۲]. در مقایسه با ریزشبه‌های جریان متناوب، ریزشبه DC دارای بازدهی بالاتری بوده [۳] و از ظرفیت انتقال توان بیشتری برخوردار هستند [۴]. در این نوع از ریزشبه‌ها منابع تولیدکننده و مصرف‌کننده راحت‌تر به یکدیگر متصل می‌شوند [۵]. به علت ماهیت جریان DC و نرخ بالای تغییر جریان در ریزشبه‌های DC در شرایط خطا استفاده از روش‌های حفاظتی مرسوم در سیستم‌های جریان متناوب کارساز نبوده و امکان حفاظت مؤثر در ریزشبه‌های DC را دچار چالش نموده است. در ریزشبه‌های DC امکان وقوع دو نوع از خطا، شامل خطای خط یا قطب به زمین و خطای خط به خط، وجود دارد [۶]. خطای خط به خط به علت داشتن پوشش کابل‌ها به ندرت در طول خط رخ می‌دهد و اغلب در داخل خود کانورترها احتمال رخ دادن آن وجود

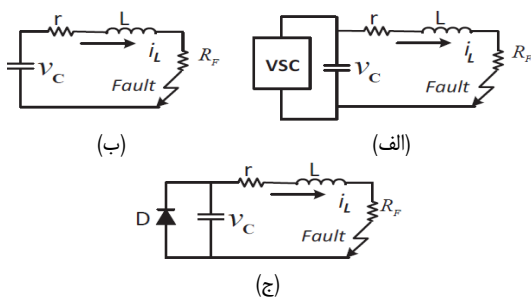
این مقاله در تاریخ ۲ مرداد ماه ۱۳۹۸ دریافت و در تاریخ ۱۵ بهمن ماه ۱۳۹۸ بازنگری شد.

سعید عباسی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران، (email: s.abbasi@edu.ikiu.ac.ir).

نوید غفارزاده (نویسنده مسئول)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران، (email: ghaffarzadeh@eng.ikiu.ac.ir).



شکل ۱: ریزشبه مورد آزمایش.



شکل ۲: مدار معادل کانورتر در خط DC دچار خطاشده [۱۵]، (الف) شبکه دچار خطاشده، (ب) مدار معادل مرحله اول و (ج) مدار معادل مرحله دوم.

منبع ولتاژ (VSC) به ریزشبه متصل شده و وظیفه کنترل ولتاژ ریزشبه را بر عهده دارد. همچنین در باس ۳ نیز یک باتری با ظرفیت ۲۵۰ Ah توسط یک کانورتر دوطرفه کنترل شده با جریان وصل شده است. منابع تولید پراکنده نیز دو واحد PV با ظرفیت‌های ۱۰ kw و ۵ kw به ترتیب در باس ۴ و ۵ توسط کانورتر DC/DC به ریزشبه وصل شده‌اند. در هر باس نیز یک خازن با ولتاژ اولیه ۷۰۰ ولت به کار رفته است [۱۴]. در جدول ۱ نیز مشخصات کامل این ریزشبه داده شده است. ضمناً قابل ذکر است که برای شبیه‌سازی و بررسی صحت روش پیشنهادی از نرم‌افزار MATLAB/Simulink استفاده کرده‌ایم.

### ۳- آنالیز خطای خط به زمین در کابل

به طور کلی در شرایط خطا بدون توجه به موقعیت اتصال کوتاه در کابل DC، می‌توان آن را با یک مدار معادل مانند شکل ۲ نشان داد. در شرایط خطا، سوئیچ‌های موجود در کانورترها یعنی IGBTها برای محافظت از خود در برابر خطا، می‌توانند مسدود شوند و دیودهای معکوس موجود را در برابر اضافه جریان قرار دهند. به علت وجود خازن‌های باردار و امپدانس پایین ارائه شده توسط کابل وقوع اتصال کوتاه در کابل DC ممکن است منجر به جریان خطای زیادی شود. برای یافتن پاسخ کامل مدار غیر خطی، خطا در دو مرحله مختلف تحلیل می‌شود. مرحله اول واکنش طبیعی مدار RLC برای هنگامی که خطا رخ می‌دهد و خازن DC شروع به تخلیه می‌کند است و مرحله دوم وقتی که جریان خطا به بیشترین مقدار خود رسیده و ولتاژ خازن کمتر از پیک ولتاژ ورودی باشد، شروع می‌شود که در این مرحله فروپاشی ولتاژ رخ داده و صدمات شدیدی به ریزشبه وارد می‌شود [۱۵].

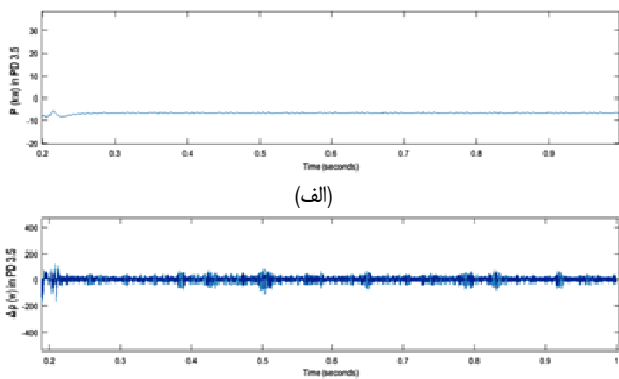
جدول ۱: مشخصات ریزشبه مورد آزمایش [۱۴].

DC Grid Voltage	۷۰۰ volt
AC Grid in Bus ۲	Connected with DC/DC bidirectional converter and a voltage source convertor
Battery in bus ۳	۳۰۰ V, ۲۵۰ Ah, Nickel-metal-hybrid
Solar Panel in Bus ۵	۱۰ kw
Solar Panel in Bus ۴	۵ kw
Ac load in Bus ۱	۵ kw CPL
DC load in Bus ۶	۱۰ kw
Filter Capacitor, C	۱ mF
Cable Resistance	۰.۳۲۹۳ ohm per km
Cable Inductance	۵۲۷.۲۶ μH km

می‌دهد. در این طرح به علت استفاده از مشتقات مرتبه اول و دوم، تأخیر زمانی رخ می‌دهد که این عامل سبب می‌شود سیستم در برابر شرایط خطا دچار تنش شود. در [۱۶] محققان با استفاده از رله اضافه جریان هیبریدی و تبدیل موجک گسسته روشی برای تشخیص خطا ارائه کرده‌اند. مهم‌ترین عیب این روش عدم تشخیص دقیق خطا در رله‌هایی که در محدوده دچار خطا هستند می‌باشد. تشخیص خطا با استفاده از امواج سیار در [۱۷] ارائه شده که از سرعت بالایی در تشخیص خطا برخوردار است. اما این روش مستلزم به کارگیری دستگاه‌های پرهزینه‌ای برای سرعت‌بخشیدن در دریافت اطلاعات می‌باشد. در این مقاله یک روش حفاظت غیر واحد برای تشخیص خطا در یک ریزشبه ولتاژ پایین DC معرفی می‌گردد. این روش نیازمند هیچ گونه خطای ارتباطی نبوده و تنها با استفاده از متغیرهای محلی به تشخیص خطا می‌پردازد. این روش با اندازه‌گیری جریان و ولتاژ در ابتدای هر خط، تغییرات توان لحظه‌ای را اندازه‌گیری نموده و با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، خطا را تشخیص می‌دهد. طرح پیشنهادی از سرعت و دقت عملکرد بالایی برخوردار بوده و قادر است خطای خطا به زمین را در مدت زمان ناچیزی تشخیص دهد.

### ۲- ساختار ریزشبه مورد آزمایش

برای طراحی طرح حفاظتی و اجرای آن از یک ریزشبه جریان مستقیم ولتاژ پایین استفاده کرده‌ایم که در شکل ۱ نشان داده شده است. این ریزشبه در ولتاژ ۷۰۰ ولت DC کار می‌کند. در باس ۱ آن بار توان ثابت از نوع AC قرار گرفته است. شبکه اصلی برق نیز توسط یک کانورتر



(ب)

شکل ۴: (الف) توان لحظه‌ای و (ب) تغییرات توان لحظه‌ای در رله ۳.۵ PD در شرایط عادی.

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} = v_k \frac{\Delta i}{\Delta t} + i_k \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (۶)$$

در (۲) تا (۴)،  $k$  لحظه نمونه‌برداری است و  $v_k, v_{k-1}, i_k, i_{k-1}$  و  $p_k, p_{k-1}$  به ترتیب ولتاژ، جریان و توان نمونه‌برداری شده در لحظات  $k-1$  و  $k$  می‌باشد. همچنین به دلیل این که فرکانس نمونه‌برداری در نرم‌افزار برای تمامی اندازه‌گیری‌ها یکسان در نظر گرفته شده است، در نتیجه ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده در یک لحظه هستند و تغییرات توان لحظه‌ای را می‌توان با استفاده از (۷) به دست آورد

$$\Delta p = v_k \Delta i + i_k \Delta v \quad (۷)$$

برای حفاظت از ریزشکده جریان مستقیم در برابر خطا، الگوریتم پیشنهادی باید در تمامی وسایل حفاظتی اعمال شود. برای به دست آوردن تغییرات توان در شبیه‌سازی به صورت نمونه‌برداری، از نمونه ولتاژ و جریان و (۷) استفاده می‌کنیم. شکل ۴ یک نمونه از توان و تغییرات توان را در رله ۳.۵ PD برای شرایط عادی نشان می‌دهد.

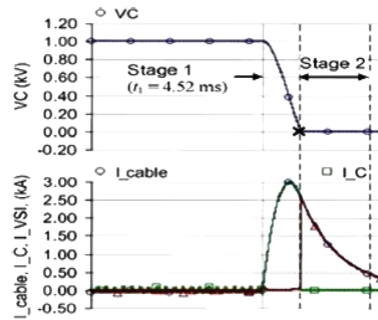
#### ۴- تنظیمات مقادیر اولیه

هنگامی که خطا در یک خط رخ می‌دهد، رله مربوط به آن خط نسبت به سایر رله‌ها، تغییرات توان بیشتری را می‌بیند. برای به دست آوردن مقادیر اولیه برای هر رله بدترین شرایط برای وقوع خطا یعنی هنگامی که خطا به صورت امپدانس بالا و در انتهای کابل رخ دهد، را در نظر گرفته و بیشترین مقدار تغییر توان را به عنوان مقدار اولیه آن خط در نظر می‌گیریم. در این مقاله مطابق [۱۵] مقدار خطای امپدانس بالا به صورت  $R_F = 0.6$  فرض شده است. به طور نمونه برای تعیین مقدار اولیه رله ۳.۵ PD یک خطای امپدانس بالا در انتهای خط (خطای F۱) اعمال می‌کنیم که تغییر توان در این شرایط در شکل ۵ نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است حداکثر تغییر توان در رله ۳.۵ PD به صورت زیر است

$$\Delta P_{\text{THRESHOLD}} = \Delta P_{\text{max}} = 2438.84 \quad (۸)$$

شکل ۶ تغییرات توان برای خطای F۱ که در خط ۳-۵ رخ داده است را در چند نمونه از رله‌ها نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که در شرایط خطا، تغییرات توان در خطی که در آن خطا رخ داده است، بیشتر بوده و درستی عبارات به دست آمده در قسمت‌های قبل را ثابت می‌کند.

در جدول ۲ مقادیر اولیه برای تمامی رله‌ها داده شده است. با استفاده از این مقادیر تنظیمات اولیه رله انجام گرفته و الگوریتم پیشنهادی را در آنها



شکل ۳: پاسخ خطا در کابل DC متصل به VSC [۱۸].

پاسخ خطا در طی این دو مرحله را می‌توان در شکل ۳ مشاهده کرد [۱۸]. مدت زمان لازم برای تشخیص خطا در هر نوع روش حفاظتی باید تا قبل رسیدن به مرحله دوم باشد. این زمان با توجه به مقالات مختلفی که ارائه شده است تقریباً به طور رایج کمتر از پنج میلی‌ثانیه می‌باشد. همان گونه در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در شرایط عادی ولتاژ و جریان نیز در ریزشکده تقریباً ثابت هستند. با وقوع خطا جریان نیز زیاد شده و هم‌زمان ولتاژ خازن افت می‌کند و این مرحله تا زمانی که جریان به حداکثر خود و ولتاژ نیز به کمترین مقدار از ورودی خود برسد، ادامه دارد و بعد از این مرحله، مرحله دوم نیز شروع می‌شود. در این مرحله در خروجی کانورتر فروپاشی ولتاژ رخ داده و سبب آسیب‌رسیدن به آن می‌شود. تغییر در جریان و ولتاژ می‌تواند سبب تغییر در توان لحظه‌ای شود. در نتیجه در شرایط خطا مطابق شکل ۳ که هم ولتاژ و هم جریان تغییر می‌کند، باید شاهد تغییرات بزرگی در توان لحظه‌ای باشیم و به عبارت دیگر با استفاده از این نکته می‌توان خطا را به راحتی تشخیص داد. هنگامی که در ریزشکده جریان مستقیم ولتاژ پایین، خطا رخ می‌دهد، توان لحظه‌ای همانند (۱) می‌باشد که وابسته به مقادیر جریان و ولتاژ است. برای به دست آوردن تغییرات توان لحظه‌ای در شرایط خطا ابتدا تغییرات ولتاژ و جریان را به دست آورده و سپس با استفاده از آنها تغییرات توان لحظه‌ای را به دست می‌آوریم

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (۱)$$

#### ۳-۱ محاسبات $dv/dt$ و $di/dt$

$$\frac{di}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{i(t + \Delta t) - i(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (۱-۱)$$

$$\frac{dv}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v(t + \Delta t) - v(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (۲-۱)$$

عبارت‌های  $\Delta i$  و  $\Delta v$  را می‌توان به صورت (۲) و (۳) نوشت

$$\Delta i = i_k - i_{k-1} \quad (۲)$$

$$\Delta v = v_k - v_{k-1} \quad (۳)$$

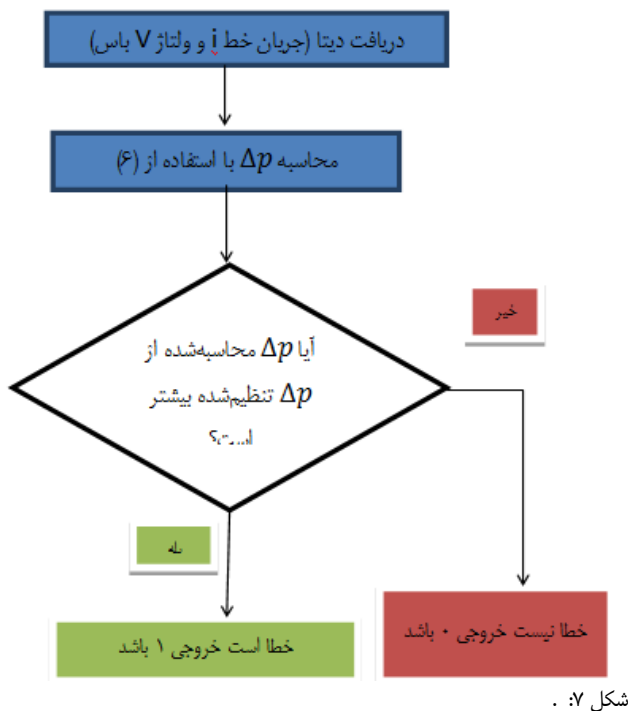
#### ۳-۲ محاسبه $dp/dt$

$$\Delta p = p_k - p_{k-1} \quad (۴)$$

$$\frac{dp}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p(t + \Delta t) - p(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{dv(t)}{dt} i(t) + \frac{di(t)}{dt} v(t) \quad (۵)$$

با جایگذاری (۲) و (۳) در (۵) می‌توان تغییرات توان لحظه‌ای را به دست آورد



شکل ۷: .

جدول ۲: مقادیر اولیه طرح حفاظتی.

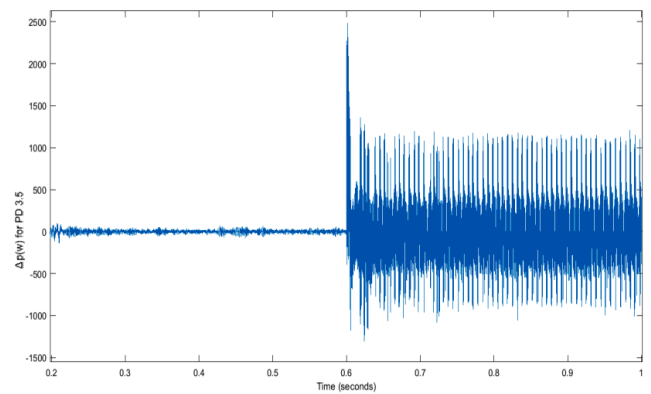
نام رله	$\Delta P_{max}(w)$
PD ۱.۲	۴۳۹,۷۲
PD ۲.۱	۴۵۵۵,۸
PD ۱.۳	۳۹۲۲,۵۵
PD ۳.۱	۱۳۹۱,۷۵
PD ۲.۴	۳۵۸۷,۹
PD ۴.۲	۳۲۶۹۹
PD ۴.۶	۳۳۲۹,۵۰
PD ۶.۴	۱۷۷۰,۱۵
PD ۳.۵	۲۳۰۶,۵
PD ۵.۳	۱۸۴۰,۵
PD ۶.۵	۱۷۲۵,۵
PD ۵.۶	۲۴۳۸,۸۵

خطای اتصال کوتاه توسط رله با استفاده از الگوریتم پیشنهادی در مدت  $250 \mu s$  تشخیص داده شد. همچنین در این حالت تغییرات توان در برخی از رله‌های دیگر در شکل ۹ نشان داده شده که حداکثر تغییرات توان لحظه‌ای همگی آنها از مقدار اولیه داده شده برای رله‌های آنها در جدول ۲، کمتر بوده که این بیانگر دقت روش پیشنهادی می‌باشد.

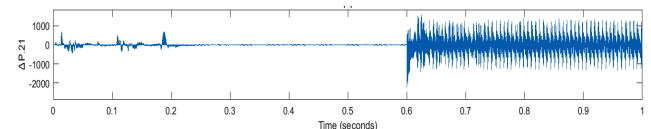
### ۶-۲ خطای اتصال کوتاه با امپدانس دلخواه

برای آزمایش طرح حفاظتی پیشنهادی در این شرایط فرض می‌کنیم یک خطا با مقاومت خطای  $R_F = 0.3$  در وسط خط بین باس ۵ و ۶ رخ دهد. مطابق شکل ۱۰ صحت عملکرد طرح پیشنهادی را برای تشخیص این خطا مشاهده می‌کنیم که در مدت زمان  $350 \mu s$  عمل کرد که بیانگر تشخیص سریع و دقیق آن می‌باشد.

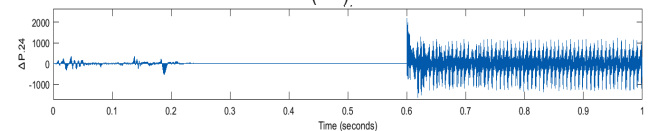
مطابق شکل ۱۱ تغییرات توان در هیچ کدام از رله‌های نشان داده شده از مقدار اولیه خود بالاتر نبوده که بیانگر دقت عملکرد روش پیشنهادی می‌باشد.



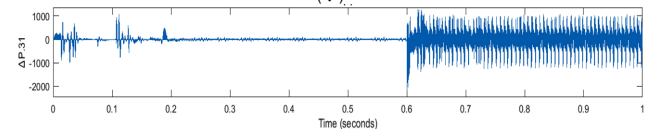
شکل ۵: تغییرات توان در رله ۳.۵ PD برای خطای F۱.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶: تغییرات توان لحظه‌ای برای خطای F۱ در رله‌های (الف) PD ۲.۱، (ب) PD ۲.۴ و (ج) PD ۳.۱.

اجرا می‌کنیم. لازم به ذکر است که مقادیر این جدول با انتخاب مقاومت خطا به اندازه  $0.6$  اهم به عنوان امپدانس مقاومت بالا مطابق [۱۵] به دست آورده شده‌اند.

### ۵- الگوریتم پیشنهادی برای تشخیص خطا

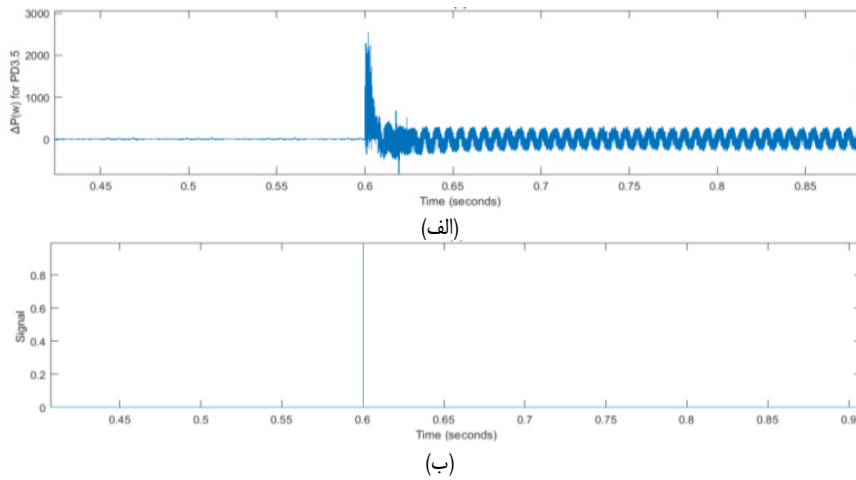
وسایل حفاظتی واقع در ابتدا و انتهای هر خط به طور دائم ولتاژ باس و جریان خط را اندازه‌گیری می‌کنند و سپس با استفاده از (۷) تغییرات توان را در هر لحظه به دست آورده و مطابق الگوریتم پیشنهادی در شکل ۷، آن را با مقادیر اولیه خود که برای هر رله در جدول ۲ آمده است مقایسه می‌کنند. در صورتی که تغییر توان به دست آمده، از مقدار اولیه تنظیمی کمتر باشد بیانگر آن است که خطایی رخ نداده و الگوریتم خروجی ۰ را نشان می‌دهد ولی در صورتی که این مقدار بیشتر از مقدار اولیه باشد، نشان‌دهنده وقوع خطا می‌باشد و خروجی الگوریتم ۱ می‌باشد که بیانگر تشخیص خطا است.

### ۶- شبیه‌سازی

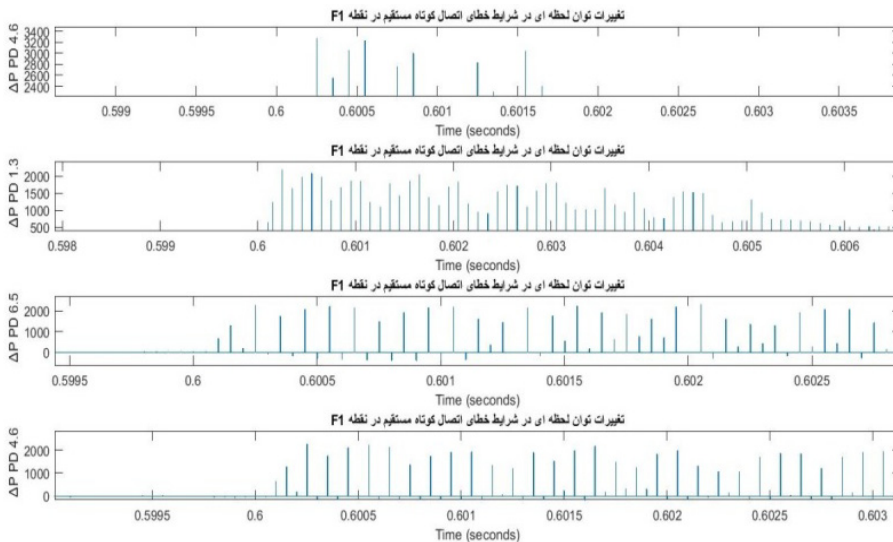
برای شبیه‌سازی طرح حفاظتی پیشنهادی سه نوع خطا را در ریزشکبه شبیه‌سازی نموده و صحت عملکرد طرح حفاظتی را نشان می‌دهیم.

#### ۱-۶ خطای اتصال کوتاه مستقیم ( $R_F = 0$ )

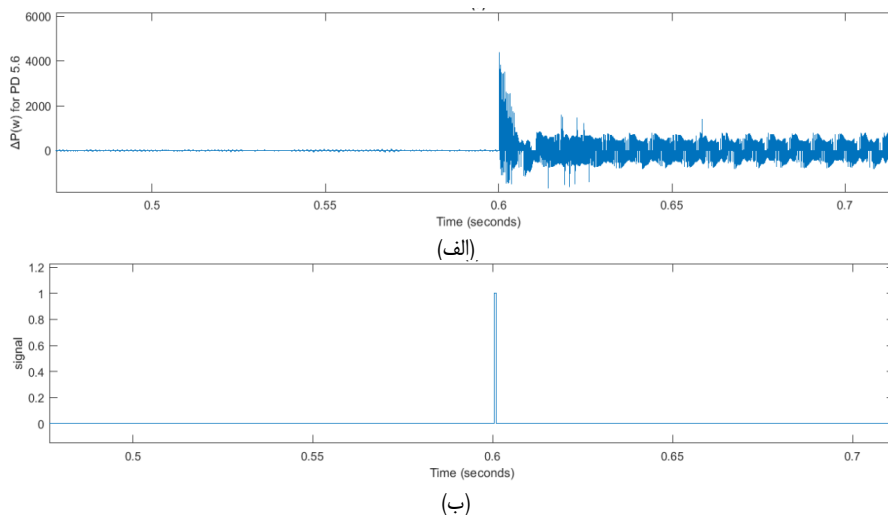
برای شبیه‌سازی این خطا فرض می‌کنیم که در نقطه F۱ این خطا رخ داده باشد. برای هنگامی که خطای اتصال کوتاه در F۱ رخ می‌دهد عملکرد رله ۳.۵ PD در شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق شکل ۸



شکل ۸: (الف) تغییرات توان دیده‌شده توسط رله و (ب) خروجی الگوریتم پیشنهادی.



شکل ۹: تغییرات توان در رله‌های مختلف در شرایط خطای اتصال کوتاه مستقیم در نقطه F1.

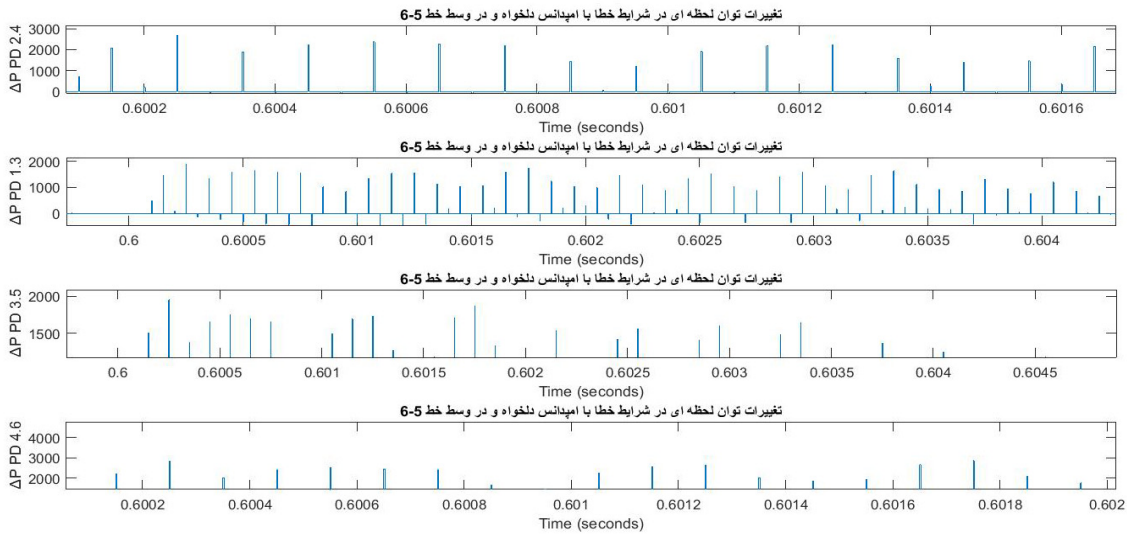


شکل ۱۰: (الف) تغییرات توان دیده‌شده توسط رله PD ۵.۶ و (ب) خروجی الگوریتم پیشنهادی.

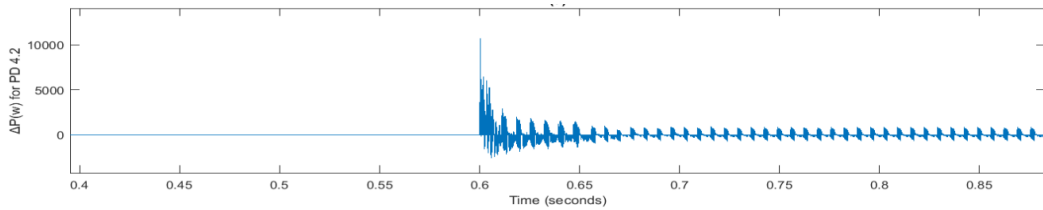
همان گونه که از شکل ۱۳ مشخص می‌باشد تغییرات توان در این شرایط برای رله‌های مختلف که خارج از خط دچار خطا هستند به مقدار شرایط اولیه مربوط به خود که در جدول ۲ آمده نمی‌رسند و در نتیجه نسبت به خطا واکنشی ندارند. لازم به ذکر است در شکل‌های ۱۲ و ۱۰ که در آن خروجی الگوریتم پیشنهادی در چند قسمت خروجی ۱ را داده است به این علت می‌باشد که چون روش پیشنهادی در مقاله را فقط برای

### ۳-۶ خطای اتصال کوتاه امپدانس بالا

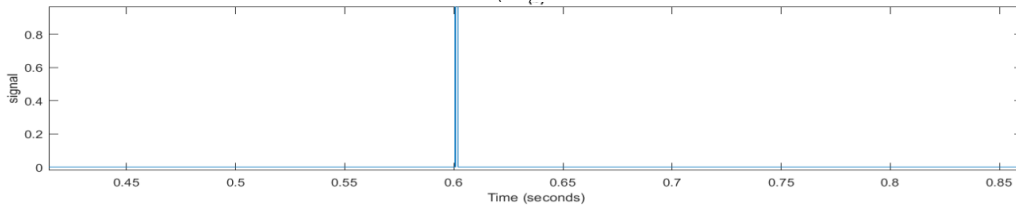
برای بررسی طرح حفاظتی در این شرایط، یک خطای امپدانس بالا با مقدار  $R_F = 0.6$  اهم را در خط ۲ و ۴ اعمال می‌کنیم. شکل ۱۲ خروجی طرح حفاظتی را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، سیگنال خروجی که بیانگر تشخیص خطا می‌باشد در مدت زمان  $500 \mu s$  ظاهر می‌شود.



شکل ۱۱: تغییرات توان لحظه‌ای در شرایط خطای اتصال کوتاه با امیدانس دلخواه در رله‌های مختلف.

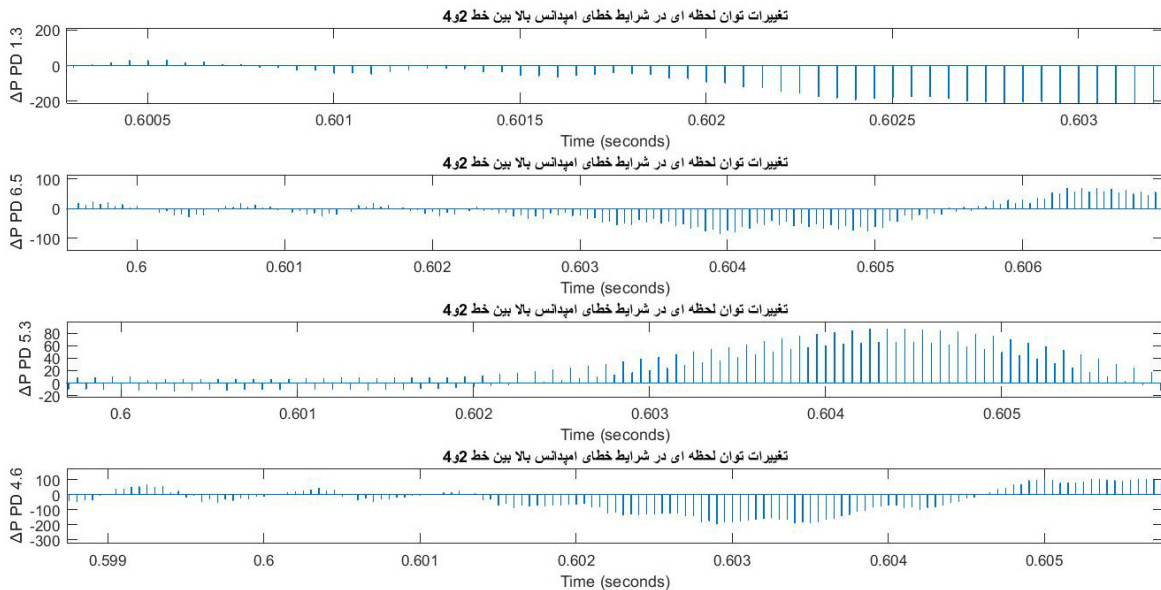


(الف)



(ب)

شکل ۱۲: (الف) تغییرات توان دیده‌شده توسط رله ۴.۲ PD در خطای امیدانس بالا و (ب) خروجی الگوریتم پیشنهادی.



شکل ۱۳: تغییرات توان لحظه‌ای در شرایط خطای اتصال کوتاه با امیدانس بالا در رله‌های مختلف.

### ۷- نتیجه‌گیری

در ریزشکبه‌های جریان مستقیم خطی به زمین رایج‌ترین نوع خطا می‌باشد که منجر به آسیب‌های شدیدی به اجزای ریزشکبه می‌گردد.

تشخیص خطا و نه رفع آن در ریزشکبه استفاده نموده‌ایم مقدار تغییرات توان با ادامه خطا، بیشتر از یک بار از مقدار اولیه تنظیم شده بیشتر شده است و به همین دلیل الگوریتم پیشنهادی به تعداد بیشتری خروجی یک داده است.

- [10] S. D. A. Fletcher, P. J. Norman, S. J. Galloway, P. Crolla, and G. M. Burt, "Optimizing the roles of unit and non-unit protection methods within DC microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 2079-2087, Dec. 2012.
- [11] G. Madingou, M. Zarghami, and M. Vaziri, "Fault detection and isolation in a DC microgrid using a central processing unit," in *Proc. IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conf., ISGT'15*, 5 pp., Washington, DC, USA, 18-20 Feb. 2015.
- [12] L. Tang and B. Ooi, "Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC systems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 3, pp. 1877-1884, Jul. 2007.
- [13] A. Meghwani, S. Chakrabarti, and S. C. Srivastava, "A fast scheme for fault detection in DC microgrid based on voltage prediction," in *Proc. National Power Systems Conf., NPSC'16*, 6 pp., Bhubaneswar, India, 19-21 Dec. 2016.
- [14] V. Nougain, V. Nougain, and S. Mishra, "Low-voltage DC ring-bus microgrid protection with rolling mean technique," in *Proc. IEEE/IEEMA Engineer Infinite Conf., eTechNxt'18*, 6 pp., New Delhi, India, 13-14 Mar. 2018.
- [15] A. Meghwani, S. C. Srivastava, and S. Chakrabarti, "A non-unit protection scheme for DC microgrid based on local measurements," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 32, no. 1, pp. 172-181, Feb. 2017.
- [16] K. A. Saleh, A. Hooshyar, and E. F. El-Saadon, "Hybrid passive-over current relay for detection of faults in low-voltage DC grids," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 8, no. 3, pp. 1129-1138, May 2017.
- [17] S. Azizi, M. Sanaye Pasand, M. Abedini, and A. Hasani, "A traveling-wave based methodology for wide-area fault location in multiterminal DC systems," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 29, no. 6, pp. 2252-2260, Dec. 2014.
- [18] J. Yang, J. E. Fletcher, and J. O'Reilly, "Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based DC network cables," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 10, pp. 3827-3837, Oct. 2012.

**سعید عباسی** در سال ۱۳۹۴ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه گیلان و در سال ۱۳۹۷ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) قزوین دریافت نمود. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان در زمینه انرژی‌های نو، حفاظت ریزشکده‌ها و بهینه‌سازی می‌باشد.

**نوید غفارزاده** در سال ۱۳۸۶ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت را با رتبه ۱ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و مدرک دکتری خود در رشته مهندسی برق قدرت را با رتبه ۱ در سال ۱۳۹۰ دریافت کرد. دکتر نوید غفارزاده دانشیار و عضو هیأت علمی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از حفاظت الکتریکی سیستم‌های قدرت، شبکه‌های هوشمند الکتریکی، انرژی‌های نو و الگوریتم‌های بهینه‌سازی.

در این مقاله یک طرح حفاظتی بر اساس تغییرات توان لحظه‌ای در ابتدای خط، برای تشخیص این نوع خطا ارائه گردیده است. برای تعیین طرح حفاظتی خطای خط به زمین مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از تغییرات ولتاژ و جریان به بررسی تغییرات توان لحظه‌ای در شرایط خطا پرداخته شد و با استفاده از آن طرح حفاظتی پیشنهادی نیز ارائه گردید. در طرح حفاظتی ارائه‌شده از هیچ گونه خط ارتباطی برای تشخیص خطا استفاده نشده و تنها مبتنی بر اندازه‌گیری‌های محلی در ابتدای هر خط می‌باشد. برای بررسی و صحت طرح حفاظتی در شرایط مختلفی مورد آزمایش قرار گرفت که در تمامی موارد خطا را در مدت زمان چند میکروثانیه تشخیص داده است که بیانگر سرعت عملکرد و تشخیص سریع طرح حفاظتی می‌باشد.

## مراجع

- [1] W. Javed and D. Chen, "Low voltage DC microgrid protection system-a review," in *Proc. IEEE 53rd Int. Universities Power Engineering Conf., UPEC'18*, 6 pp., Glasgow, UK, 4-7 Sept. 2018.
- [2] M. Starke, L. Tolbert, and B. Ozpineci, "AC vs. DC distribution: a loss comparison," in *Proc. IEEE/PES Transmission Distribution Conf. Exposition*, 7 pp., Chicago, IL, USA, 21-24 Apr. 2008.
- [3] Q. Deng, "Fault Protection in DC Microgrids Based on Autonomous Operation of All Components," Ph.D. Diss., University of South Carolina, 2017.
- [4] S. A. Amamra, H. Ahmed, and R. A. El-Sehiemy, "Firefly algorithm optimized robust protection scheme for DC microgrid," *Electric Power Components and Systems*, vol. 45, no. 10, pp. 1141-1151, Jul. 2017.
- [5] D. Salomonsson, L. Soder, and A. Sannino, "Protection of low-voltage DC microgrids," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 24, no. 3, pp. 1045-1053, Jul. 2009.
- [6] M. Ghaffarpour Jahromi, G. Mirzaeva, S. D. Mitchell, and D. Gay, "Advanced fault tolerance strategy for DC microgrids in mining excavators," in *Proc. IEEE 24th Int. Symp. on Industrial Electronics, ISIE'15*, pp. 1502-1507, Buzios, Brazil, 3-5 Jun. 2015.
- [7] J. Park, J. Candelaria, L. Ma, and K. Dunn, "DC ring-bus microgrid fault protection and identification of fault location," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 28, no. 4, pp. 2574-2584, Oct. 2013.
- [8] S. D. A. Fletcher, P. J. Norman, K. Fong, S. J. Galloway, and G. M. Burt, "High-speed differential protection for smart DC distribution systems," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 5, pp. 2610-2617, Sept. 2014.
- [9] N. Bayati, A. Hajizadeh, and M. Soltani, "Protection in DC microgrids: a comparative review," *IET Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 66-75, Oct. 2018.