



## محور ۲: ارائه روشها و الگوریتمهای نوین در حفاظت سیستمهای قدرت

021024

### یک طرح تطبیقی جهت حفاظت دیستانس خطوط انتقال متصل به مزرعه بادی

جواد ساده

محمد کهترپور

دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد

**واژه‌های کلیدی:** رله دیستانس، حفاظت تطبیقی، نیروگاه بادی، ارتباط سرعت پایین.

#### چکیده

اخیراً نیروگاههای بادی جهت تولید توان در سطوح بالا مورد توجه قرار گرفته‌اند. بطوریکه در اکثر موارد نیاز است که توان تولید شده توسط این نیروگاهها، به نواحی مصرف‌کننده انرژی انتقال یابد. اتصال این نیروگاهها به شبکه انتقال مشکلاتی را در زمینه حفاظت خطوط انتقال بوجود می‌آورد. این مشکلات بدلیل تغییرات گسترده پارامترهای بهره‌برداری و ساختاری این نیروگاهها که جزء خواص ذاتی آنها و عمده آن ناشی از وجود نوسان غیرقابل کنترل انرژی ورودی است می‌باشد. در این مقاله حفاظت دیستانس چنین خطوطی بررسی می‌شود. امروزه حتی در شبکه‌های سنتی که پارامترهای مؤثر در مشخصه عملکرد رله دیستانس نسبت به شبکه‌های متصل به مزارع بادی، در بازه بسیار محدودتری تغییر می‌کند نیز، جهت کارکرد مناسب‌تر سیستم حفاظتی، راهکارهای تطبیقی ارائه شده است. لذا حفاظت خط انتقال در شبکه مورد مطالعه شامل مزرعه بادی که پارامترهای بهره‌برداری و ساختاری آن در بازه وسیعی تغییر می‌کند، قطعاً نیاز به روشهای تطبیقی دارد. در این مقاله ابتدا پارامترهای تأثیرگذار بر مشخصه رله دیستانس در شبکه مورد مطالعه دارای مزرعه بادی بررسی می‌شود. سپس به ارائه روشی مبتنی بر کانالهای مخابراتی سرعت پایین پرداخته شده است. در انتها حساسیت این روش ارزیابی شده و از جنبه‌های مختلف با دیگر روشهای از پیش ارائه شده مقایسه می‌گردد.



## یک طرح تطبیقی جهت حفاظت دیستانس خطوط انتقال متصل به مزرعه بادی

محمد کهرپور  
جواد ساده  
دانشگاه آزاد اسلامی - واحد گناباد

واژه های کلیدی: رله دیستانس، حفاظت تطبیقی، نیروگاه بادی، ارتباط سرعت پایین

### چکیده:

مزارع بادی، در بازه‌ی بسیار محدودتری تغییر می‌کند نیز، جهت کارکرد مناسب‌تر سیستم حفاظتی، راهکارهای تطبیقی ارائه شده است. لذا حفاظت خط انتقال در شبکه مورد مطالعه شامل مزرعه‌ی بادی که پارامترهای بهره‌برداری و ساختاری آن در بازه‌ی وسیعی تغییر می‌کند، قطعاً نیاز به روشهای تطبیقی دارد. در این مقاله ابتدا پارامترهای تاثیرگذار بر مشخصه‌ی رله دیستانس در شبکه‌ی مورد مطالعه دارای مزرعه بادی بررسی می‌شود. سپس به ارائه‌ی روشی مبتنی بر کانالهای مخابراتی سرعت پایین پرداخته شده است. در انتها حساسیت این روش ارزیابی شده و از جنبه‌های مختلف با دیگر روشهای از پیش ارائه شده مقایسه می‌گردد.

اخیراً نیروگاههای بادی جهت تولید توان در سطوح بالا مورد توجه قرار گرفته‌اند. بطوریکه در اکثر موارد نیاز است که توان تولید شده توسط این نیروگاه‌ها، به نواحی مصرف کننده انرژی انتقال یابد. اتصال این نیروگاهها به شبکه انتقال مشکلاتی را در زمینه‌ی حفاظت خطوط انتقال بوجود می‌آورد. این مشکلات بدلیل تغییرات گسترده‌ی پارامترهای بهره‌برداری و ساختاری این نیروگاهها که جزء خواص ذاتی آنها و عمده‌ی آن ناشی از وجود نوسان غیرقابل کنترل انرژی ورودی است، می‌باشد. در این مقاله حفاظت دیستانس چنین خطوطی بررسی می‌شود. امروزه حتی در شبکه‌های سنتی که پارامترهای مؤثر در مشخصه عملکرد رله دیستانس نسبت به شبکه‌های متصل به

## ۱- مقدمه

اکثر تحقیقاتی که در رله گذاری تطبیقی صورت گرفته است بر روی رله های دیستانس، متمرکز می باشد به این دلیل که ضمن کاربرد زیاد این رله ها، مشخصه ی آن تحت شرایط مختلف شبکه نیاز به اصلاح جدی دارد. در تحقیقات انجام شده در این زمینه مشخصه ی چهار ضلعی رله دیستانس مد نظر قرار گرفته است چرا که این مشخصه نسبت به انواع امپدانس و مهو در خطاهای اتصال به زمین دارای مقاومت خطای غیرصفر، بسیار دقیق تر عمل می کند و مهمتر اینکه در این مشخصه قابلیت تغییر هر یک از اضلاع بطور جداگانه وجود دارد. در مشخصه ی چهارضلعی، ضلع بالایی، که متناظر با خطاهای احتمالی در انتهای ناحیه حفاظتی می باشد و ضلع سمت راست که متناظر با خطاهای احتمالی به ازای حداکثر مقاومت خطا در طول ناحیه ی حفاظتی می باشد، بیشترین تاثیر پذیری را نسبت به شرایط متفاوت شبکه دارند. نویسندگان مراجع [۱-۳] هر کدام به روش خاصی مبتنی بر فرضیات مختلف سعی کرده اند ضلع بالایی این مشخصه که معمولاً بدلیل تغییر در شرایط بهره برداری دچار اضافه برد<sup>۱</sup> و کاهش برد<sup>۲</sup> رله می شود را بطور تطبیقی اصلاح نمایند.

در مرجع [۴] مشخصه ی چهارضلعی رله دیستانس بطور دقیق تر مورد بررسی قرار گرفته است. در این مرجع با استفاده از روابط دقیق محاسبه ی امپدانس حاصل از شبکه های توالی در خطای تک فاز به زمین، منحنی مشخصه ی رله ترسیم شده است که این مشخصه، مشخصه ی ایده آل رله نامیده شده است. بدست آوردن دقیق این مشخصه مستلزم وجود تمامی اطلاعات ساختاری و بهره برداری (از قبیل نسبت دامنه ی ولتاژ باس های طرفین، زاویه بار و امپدانس معادل منابع طرفین خط انتقال) می باشد. بنابراین رله دیستانس تطبیقی این اطلاعات را بطور آنلاین نیاز دارد.

جهت تامین این اطلاعات برای رله، محققین راهکارهای مبتنی بر کانالهای مخابراتی را ارایه نموده اند [۴-۷]. این روشها نتایج تئوری بسیار خوبی را به همراه دارند اما بدلیل مشکلاتی که در

امر پیاده سازی این سیستمها وجود دارد، تحقیقات در راستای طرحهای تطبیقی مستقل که دارای مزایایی از قبیل سرعت بالا، هزینه ی پیاده سازی و نگهداری کم و قابلیت اطمینان بالا می باشد، نیز همچنان ادامه دارد.

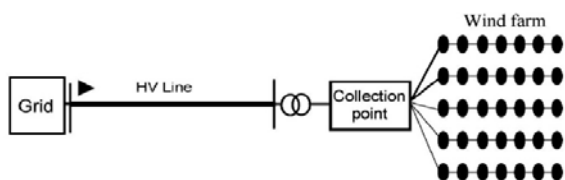
در صورتیکه شرایط ساختاری شبکه تقریباً ثابت باشد، می توان با استفاده از اطلاعات پیش فرض و اطلاعات بهره برداری در محل رله که قابل اندازه گیری و محاسبه می باشد مشخصه ی نسبتاً دقیق رله را طراحی نمود [۸] و [۹].

مرجع [۸] مشخصاً به حفاظت تطبیقی خطوط انتقال متصل به نیروگاه بادی پرداخته است و یک راهکار جهت رله گذاری دیستانس در باس سمت مزرعه بادی ارایه داده است که نتایج خوبی به همراه دارد.

در این مقاله ابتدا پارامترهای تأثیرگذار بر مشخصه رله دیستانس مستقر در باس دور مزرعه بادی در شبکه نوعی بطور کامل شناسایی می شود و در ادامه اصول سیستمهای حفاظت تطبیقی موجود ذکر می گردد و امکان پذیری کاربرد آنها در شبکه ی مورد مطالعه بررسی شده است. سپس با تلفیق روشهای مستقل تطبیقی و روشهای مبتنی بر کانالهای مخابراتی یک طرح حفاظت تطبیقی عملی و بدون نیاز به کانالهای مخابراتی سرعت بالا ارائه شده است.

## ۲- شبکه ی مورد مطالعه

شکل (۱) شمای کلی یک مزرعه بادی متصل به شبکه قدرت را نشان می دهد. این مزرعه بادی شامل ۳۵ واحد مستقل مشابه، از طریق یک خط انتقال که توسط رله دیستانس حفاظت می شود، به شبکه توان تزریق می کند. دیاگرام تک-خطی این سیستم قدرت در حالیکه خطای فاز A به زمین رخ داده است در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل (۱) شمای کلی مزرعه بادی متصل به شبکه انتقال

<sup>۱</sup> -over reach

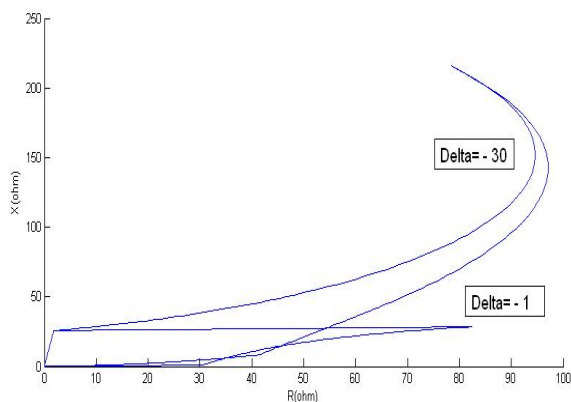
<sup>۲</sup> -under reach

### ۳- پارامترهای موثر در مشخصه رله دیستانس

جهت شناسایی خصوصیات این شبکه و نیز میزان اثرگذاری پارامترهای مختلف بر منحنی های مرزی رله دیستانس، شبیه سازی های زیر صورت گرفته است. لازم به ذکر است که در این شبیه سازی ها امپدانس خط از نوع کاملاً مقاومتی می باشد و مقدار آن بین صفر تا ۵۰ اهم در نظر گرفته شده است و ناحیه اول<sup>۵</sup> رله دیستانس ۹۰ درصد طول خط را پوشش می دهد.

#### • زاویه بار

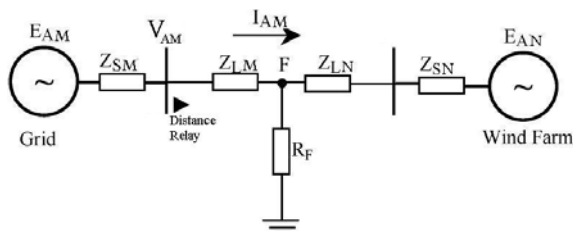
با توجه به اینکه توان تولیدی توسط نیروگاه بادی در طول روز دائماً نوسان می کند، زاویه بار نیز متناسب با آن در بازه ی وسیعی تغییر می کند. مشخصه ایده آل رله دیستانس به ازای زاویه بار ۱- و ۳۰- درجه در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود تغییر زاویه ی بار بین ۱- تا ۳۰- درجه باعث تغییر قابل توجهی در مرزهای رله می گردد.



شکل (۳) تاثیر تغییر زاویه ی بار بین ۱- تا ۳۰- درجه بر روی مشخصه

#### • نسبت ولتاژ منابع طرفین

در صورتیکه بازه ی تغییرات دامنه ولتاژ منابع ده درصد (±۰.۵) باشد، نسبت ρ بین ۰/۹ و ۱/۱ تغییر خواهد کرد. در شکل (۴) مشخصه ی رله به ازای نسبت دامنه ولتاژ طرفین (ρ)، ۰/۹، ۱ و ۱/۱ پیرونیتر ترسیم شده است.



شکل (۲) دیاگرام تک خطی مزرعه بادی متصل به شبکه الکتریکی

در این شکل  $Z_{SM}$  و  $Z_{LN}$  بترتیب امپدانس معادل تونن منبع سمت شبکه و مزرعه ی بادی می باشند. در صورت وجود مقاومت زمین در محل خطا امپدانس دیده شده توسط رله دیستانس شدیداً تحت تاثیر قرار می گیرد [۹]. امپدانس اندازه گیری شده توسط رله دیستانس با احتساب جبران توالی صفر توسط رابطه (۱) محاسبه می شود. در حالت عادی جهت پخش بار<sup>۳</sup> به سمت شبکه می باشد بنابراین جریان  $I_{AM}$  منفی می باشد.

$$Z_A = \frac{V_{AM}}{I_{AM} + K_0 I_{0M}} \quad (1)$$

در رابطه ی فوق  $V_{AM}$  ولتاژ باس در محل رله،  $K_0$  ضریب جبران سازی توالی صفر خط، و  $I_{0M}$  جریان مانده<sup>۴</sup> می باشد. امپدانس دیده شده توسط رله بر حسب پارامترهای شبکه های توالی از رابطه ی (۱۹) موجود در ضمیمه «الف» بدست می آید. در این رابطه پارامتر  $\rho.e^{-j\delta}$  بصورت زیر تعریف می شود:

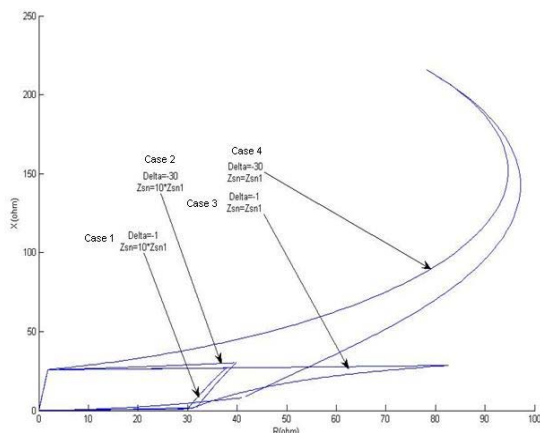
$$\rho.e^{-j\delta} = \frac{E_{AN}}{E_{AM}} \quad (2)$$

در رابطه فوق ρ نسبت دامنه ولتاژ باس دور به دامنه ولتاژ محل رله، و δ زاویه انتقال توان می باشد. همانطور که ملاحظه می شود، امپدانس اندازه گیری شده به پارامترهای ρ، δ،  $Z_{SM}$  و  $Z_{LN}$  وابسته است. در ادامه میزان تأثیر این پارامترها بر مشخصه ایده آل رله دیستانس بررسی می شود.

<sup>3</sup>-load flow direction  
<sup>4</sup>-residual current

<sup>5</sup>-first zone

واضح است که این تغییرات شدید ساختاری در امپدانس معادل باس دور رله تاثیر بسزایی در مشخصه رله دیستانس خواهد گذاشت.



شکل (۶) تاثیر تغییر امپدانس معادل باس دور رله به ازای زاویه بارهای مختلف

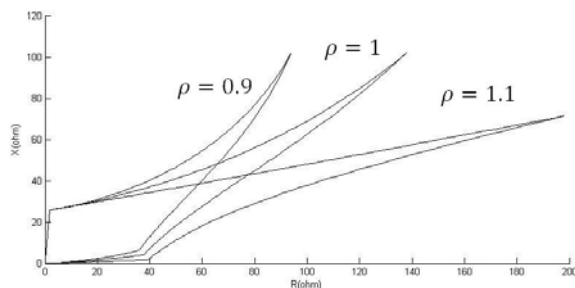
بدیهی است که در حالت نرمال مشخصه رله حاصل از تغییر زاویه بار و  $Z_{SN}$  بین حالت «۱» (معادل با حداکثر تولید توسط کلیه واحدها)، و حالت «۴» (معادل با حداقل تولید در کمترین مشارکت واحدها) تغییر می کند. بطور تقریبی این دو مشخصه حدود ۳۰٪ همپوشانی دارند بنابراین حتی رله با تنظیم ثابت بهینه، در ۷۰٪ موارد عملکرد اشتباه دارد. منظور از رله با تنظیم ثابت بهینه رله ای می باشد که مشخصه آن پس از بررسی شرایط مختلف شبکه به ازای مقادیر مختلف ممکن پارامترهای بهره برداری و ساختاری، از اشتراک نواحی مختلف بدست آید که این موضوع در مرجع [۱۰] بررسی شده است.

#### ۴- روش تنظیم تطبیقی مشخصه رله دیستانس

##### • روش مستقل تطبیقی

اکثر روشهای تطبیقی دیستانس مستقل که تاکنون ارائه شده اند تنها قادرند در شرایطی تنظیم خود را با وضعیت جاری شبکه تغییر دهند که:

الف) شرایط ساختاری شبکه تقریباً ثابت باشد و

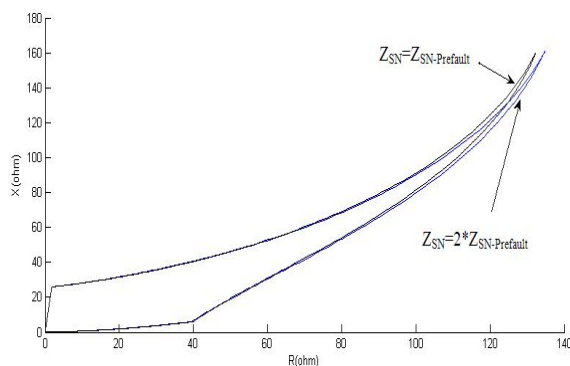


شکل (۴) مشخصه رله به ازای مقادیر مختلف نسبت ولتاژ طرفین

همانطور که در این شکل دیده می شود نسبت دامنه ولتاژ در بازه ی ده درصد تاثیر قابل ملاحظه ای در مشخصه رله دارد.

##### • امپدانس معادل شبکه (در محل رله)

با توجه به اینکه امپدانس سمت شبکه نسبت به مجموع امپدانسهای خط و مزرعه ی بادی بسیار ناچیز است، تغییر آن تاثیر چندانی روی مرزهای رله نمی گذارد. ضمن اینکه بدلیل قوی بودن شبکه مقدار امپدانس آن در بازه ی کوچکی تغییر می کند، در عین حال شکل (۵) به ازای شرایط پیش فرض (آنچه در ضمیمه ی «ب» آمده است)، و دوبرابر شدن این امپدانس ترسیم شده است.



شکل (۵) تاثیر تغییر امپدانس منبع سمت رله

##### • امپدانس معادل مزرعه ی بادی (در باس دور رله)

در شکل (۶) منحنی های مرزی رله به ازای مقدار نامی امپدانس مزرعه بادی، (آنچه در ضمیمه ی «ب» آمده است)، و ده برابر آن امپدانس ترسیم شده است. این دو حالت متفاوت ساختاری به ازای زاویه بار ۱- و ۳۰- درجه در این شکل نشان داده شده است. با توجه به مشخصه های نشان داده شده در این شکل

ب) پارامترهای بهره‌برداری تحت شرایط خاص و در بازه‌ی محدودی نوسان نمایند.

بطوریکه حتی روش ارایه شده در مراجع [۹و۸] که قادر است تحت شرایط مختلف بهره‌برداری عملکرد مناسبی داشته باشد، تغییر امیدانس معادل باس دور رله بسیار کم می‌باشد و بدلیل کوچک بودن این امیدانس در برابر امیدانس معادل منبع سمت رله تاثیر ناچیزی بر مشخصه‌ی رله می‌گذارد.

بنابراین در شبکه مورد مطالعه که هر دو پارامترهای بهره‌برداری و ساختاری باس دور تغییرات قابل ملاحظه‌ای دارند را به هیچ‌وجه نمی‌توان با روشهای مذکور، که تنها از اطلاعات موجود در محل رله استفاده می‌کنند، حفاظت نمود.

جهت حل این مشکل در شبکه‌ی مورد مطالعه و استفاده از اطلاعات مورد نیاز بایستی از کانالهای مخابراتی بهره جست. راهکارهای گوناگون حفاظت تطبیقی با استفاده از لینک ارتباطی، پیش از این در مقالات مختلف پیشنهاد شده است که نتایج تئوری بسیار خوبی نیز به همراه داشته‌اند [۴-۷و۱۱]. اما در اکثر موارد بدلیل نیاز به پیاده‌سازی کانالهای مخابراتی در سرتاسر شبکه و مشکلات مرتبط با آن که در ادامه به آن اشاره خواهد شد راهکارهای عملی نمی‌باشند.

#### • روش مبتنی بر کانالهای مخابراتی سرعت بالا

در روشهای مبتنی بر لینک ارتباطی سرعت بالا جهت عملکرد تطبیقی رله نیاز است که با استفاده از پارامترهای جاری شبکه از قبیل ولتاژ، جریان، زاویه بار و امیدانس معادل باسهای طرفین خط انتقال سیستم (که مربوط به چند سیکل قبل از خطا می‌باشد) مشخصه رله تعیین گردد و بر اساس آن در لحظه وقوع خطا تصمیم‌گیری صورت گیرد. بنابراین جهت ارسال اطلاعات حجیمی شامل دامنه و زاویه ولتاژ و جریان و نیز امیدانس معادل باس دور در مدت زمان بسیار کوتاه (چند سیکل) نیاز به لینکهای ارتباطی با ظرفیت و سرعت بالا می‌باشد.

استفاده از کانالهای مخابراتی سرعت بالا جهت انتقال اطلاعات باس دور بطور آنی هنوز عملی نشده است بطوریکه دارای معایب مهم زیر می‌باشد:

✓ کانالهای مخابراتی سرعت بالا هزینه‌ی زیادی دارند.

✓ تعمیر و نگهداری این کانالهای مخابراتی مشکل است.

✓ در لحظه خطا احتمال قطع و خرابی کانال مخابراتی نیز می‌باشد.

مهمترین عیب کانالهای مخابراتی سرعت بالا، احتمال آسیب دیدن آن در لحظه به روز خطا می‌باشد. زیرا هرگاه خطایی بر روی خطوط انتقال رخ بدهد احتمال آسیب رساندن به کانالهای مخابراتی که در مجاورت خطوط انتقال نصب شده اند نیز وجود دارد و این نوع رله‌گذاری که رله نیازمند اطلاعات آنی باس دور از طریق لینک مخابراتی می‌باشد در صورت چنین اتفاقی قادر به تصمیم‌گیری نمی‌باشد.

#### • روش متمرکز سرعت پایین (مدل امیدانس)

در روش‌های حفاظت تطبیقی متمرکز اطلاعات سرتاسر شبکه از طریق کانالهای مخابراتی سرعت پایین بطور سلسله مراتبی به یک کامپیوتر کنترل مرکزی منتقل می‌شود و در آنجا پس از مشخص شدن ساختار جاری شبکه، مدل امیدانس شبکه معین می‌شود. پس از آن، محاسبات پخش بار و اتصال کوتاه صورت می‌گیرد و محاسبات مربوط به تنظیم رله‌ها انجام شده و در نهایت این اطلاعات به رله‌های مورد نظر ارسال می‌گردد. این پروسه حدود ۱ ساعت به طول می‌انجامد [۱۱]. بنابراین از روشهای تطبیقی متمرکز با استفاده از کانالهای مخابراتی سرعت پایین نیز نمی‌توان در چنین شبکه‌ای بهره جست. زیرا قادر به دنبال کردن تغییرات سریع شرایط شبکه مورد مطالعه نمی‌باشد.

#### • روش پیشنهادی

در شبکه مورد مطالعه اگر بتوان اطلاعات ارسالی مورد نیاز را کاهش داده تا در بازه‌های زمانی کمتری به محل رله ارسال گردد و مابقی پارامترها را با استفاده از محاسبات و تحلیل بیشتر اطلاعات بدست آورد، می‌توان راهکار قابل قبول و عملی را پیشنهاد نمود. در اینجا سعی می‌شود با تلفیق دو روش رله مستقل تطبیقی و رله‌های دارای کانالهای مخابراتی، یک راهکار تطبیقی مناسب و عملی جهت مرتفع ساختن مشکلات رله‌گذاری مستقل و رله‌گذاری دارای لینک ارتباطی ارایه گردد.

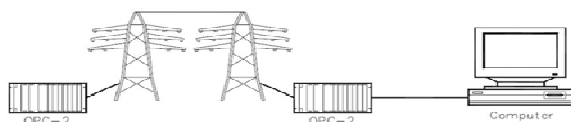
رله و تصمیم گیری آن تاثیر می گذارد. این موضوع در بخش (۴-۳-۱) بطور مفصل بررسی خواهد شد.

نکته ای که بایستی به آن توجه نمود این است که در این روش حتی با وجود اینکه از کانالهای مخابراتی سرعت پایین استفاده می شود به دلیل اینکه حجم اطلاعات مورد نیاز جهت ارسال بسیار محدود می باشد این اطلاعات در مدت زمان کوتاهی (کمتر از چند ثانیه) انتقال می یابد.

#### ۴-۱- معماری شبکه ارتباطی مورد نیاز در روش

##### پیشنهادی

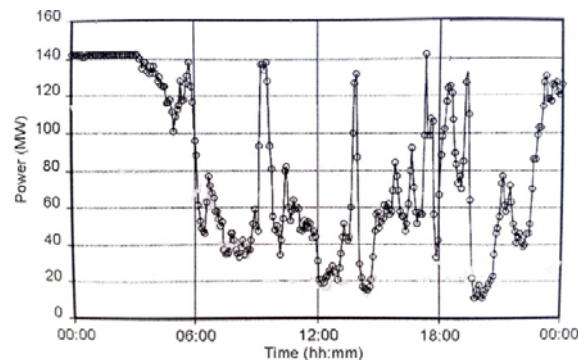
در این روش که از سیستم رله گذاری غیر متمرکز استفاده می شود، در مقایسه با روشهای مبتنی بر کانالهای مخابراتی سرعت بالا، تنها به پاسخهای سرعت پایین نظیر سیستمهای کنترل نظارتی و اکتساب داده ( $Scada^1$ ) نیاز می باشد. اطلاعات بین دو سمت خط انتقال را می توان از طریق خطوط انتقال برق (موسوم به  $PLC^2$ ) منتقل نمود. شکل (۸) شمای کلی یک کانال مخابراتی از طریق خطوط انتقال برق را نشان می دهد.



شکل (۸) شمای کلی لینک ارتباطی PLC

در روش پیشنهادی تنها ارسال اطلاعات محدود مربوط به تعداد واحدهای مشارکت کننده نیاز می باشد، که این اطلاعات بطور پیوسته اما با یک تاخیر زمانی (کمتر از چند ثانیه) به رله منتقل می شود. معمولاً سیستمهای کنترل و مانیتورینگ نیروگاهها شامل یک کامپیوتر کنترل مرکزی می باشد که اطلاعات تک تک واحدها شامل مقادیر ولتاژها، جریانها، وضعیت بریکرها و... توسط کابلهای ارتباطی به این محل انتقال می یابد. مدت زمان ارسال این اطلاعات از واحدها به کامپیوتر مرکزی در کسری از ثانیه صورت می گیرد. جهت

اکنون نیاز به بررسی بیشتر خصوصیات نیروگاه بادی و نیز آنالیز حساسیت عملکرد رله نسبت به پارامترهای مختلف می باشد. در یک مزرعه بادی بدلیل نوسانات سرعت باد توان تولیدی نیروگاه در طول روز در حال نوسان می باشد. شکل (۷) میزان توان تولیدی توسط یک مزرعه بادی نمونه را در طول شبانه روز نشان می دهد.



شکل (۷) میزان توان تولیدی در طول یک شبانه روز [۱۲]

با توجه به پیشرفتهای زیاد سیستمهای کنترلی توربینهای بادی جهت تسخیر و کنترل انرژی باد، نوسانات دائمی در سرعت باد باعث از مدار خارج شدن و/یا به مدار وارد شدن واحدها نمی شود بلکه تنها زمانی که سرعت باد بیش از اندازه شدید باشد و یا اینکه سرعت باد بیش از حد کم باشد، واحدها از مدار خارج می شوند. سرعت باد توسط سنسورهای سرعت-سنج که در محل هر واحد تولیدی نصب می شود، اندازه گیری می شود. بنابراین معمولاً ورود و خروج واحدها بطور یکجا صورت نمی گیرد و با یک فاصله زمانی اندک صورت می گیرد. در صورتیکه بتوان به روشی تعداد واحدهای مشارکت کننده را با تاخیر زمانی حدود چند ثانیه به محل رله ارسال نمود، می توان در آنجا پس از محاسبه ی امپدانس معادل مزرعه بادی، پارامتر  $p.e^{-j\delta}$  را با استفاده از رابطه (۲) با خطای بسیار کم تخمین زد و نهایتاً امپدانس دیده شده توسط رله را محاسبه کرد. با استفاده از کانال مخابراتی سرعت پایین جهت انتقال حداقل اطلاعات مورد نیاز که می تواند تنها به تعداد واحدهای مشارکت کننده خلاصه شود، این عمل قابل اجرا می باشد.

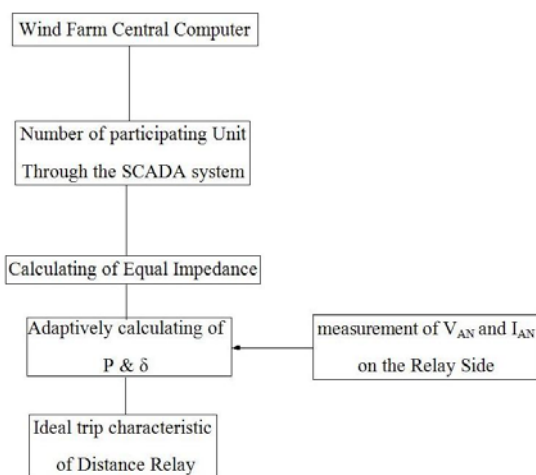
اکنون این سوال مطرح می شود که استفاده از این اطلاعات که بطور ۱۰۰٪ به روز نیستند چگونه در بدست آوردن مشخصه ی

<sup>6</sup>-supervisory control and data acquisition

<sup>7</sup>-power line carrier

$$pe^{-j\delta} = 1 - \left( \frac{I_{AM}}{E_{AM}} \right) Z_1 \quad (6)$$

با توجه به روابط فوق، در ادامه ی الگوریتم، پارامتر  $pe^{-j\delta}$  بطور تطبیقی در بازه های زمانی مشخص محاسبه می شود و نهایتاً با استفاده از روابط (۱۹ و ۲۰) موجود در ضمیمه، مشخصه ی رله دیستانس بطور تطبیقی تعیین می گردد.



شکل (۹) الگوریتم تعیین مشخصه رله دیستانس تطبیقی

#### ۳-۴- ارزیابی روش پیشنهادی و مقایسه آن با روشهای تطبیقی پیشین

##### ۴-۳-۱- آنالیز حساسیت امپدانس دیده شده توسط رله

##### ✓ امپدانس معادل مزرعه بادی

با توجه به اینکه در این روش از کانالهای مخابراتی سرعت پایین استفاده می گردد همیشه اطلاعاتی را که رله دریافت می کند مربوط به چند لحظه قبل می باشد. از طرفی ممکن است در حین این مدت زمان کوتاه، تعداد واحدهای مشارکت کننده در تولید توان کم و یا زیاد گردد. بنابراین رله در چنین مواقعی در محاسبه ی امپدانس باس دور رله دچار اشتباه خواهد شد. قبلاً به این موضوع اشاره شد که سرعت تغییر در تعداد واحدهای مشارکت کننده زیاد نمی باشد با این وجود در این بخش تاثیر امپدانس حاصل از ۱۲/۵ درصد از تعداد کل

انتقال اطلاعات از این کامپیوتر به محل رله از کانالهای مخابراتی سرعت پایین که معمولاً در خطوط انتقال برق وجود دارد استفاده می شود و نیازی به پیاده سازی کانال ارتباطی مجزا نمی باشد.

#### ۴-۲- الگوریتم تعیین مشخصه ایده آل رله دیستانس تطبیقی

همانطور که در شکل (۹) نشان داده شده است الگوریتم تعیین مشخصه رله دیستانس تطبیقی بدین ترتیب می باشد که تعداد واحدهای مشارکت کننده در مزرعه بادی در بازه های زمانی خاص از طریق لینک ارتباطی به محل رله انتقال می یابد و در آنجا امپدانس معادل مزرعه محاسبه می شود. بطور موازی مقادیر ولتاژ و جریان در محل رله ( $V_{AM}$  و  $I_{AM}$ ) اندازه گیری شده و با استفاده از رابطه (۳) مقدار تقریبی  $E_{AM}$  محاسبه می شود.

$$E_{AM} = V_{AM} + I_{AM}.Z_{1SM} \quad (3)$$

بدلیل اینکه در روش پیشنهادی، مدل امپدانس شبکه جاری در دست نمی باشد، در صورت تغییر در ساختار شبکه، مقدار امپدانس معادل سمت شبکه ( $Z_{1SN}$ ) که در محاسبه ی  $E_{AM}$  موثر است، نسبت به مقدار پیش فرض تغییر می کند. در شبکه نشان داده شده در شکل (۲) پیش از خطا، رابطه (۴) برقرار می باشد.

$$I_{AM} = \frac{E_{AM} - E_{AN}}{Z_1} \quad (4)$$

که در این رابطه با توجه به روابط ضمیمه (۷) و (۹)،  $Z_1$  بصورت زیر تعریف می شود.

$$Z_1 = Z_{1M} + Z_{1N} \quad (5)$$

با ترکیب رابطه (۲) و (۴)، پارامتر  $pe^{-j\delta}$  با استفاده از رابطه (۶) قابل محاسبه می باشد.



#### ۴-۳-۲- مقایسه روشهای پیشین با روش پیشنهادی

روشهای مختلف ارایه شده در زمینه حفاظت تطبیقی را می-توان از جنبه های مختلف مورد ارزیابی قرار داد. با توجه به خصوصیات شبکه ی مورد مطالعه، در این بخش خصوصیات و قابلیت های روشهای مختلف از نظر سرعت، قابلیت اطمینان، تطابق و اجرا و هزینه ی پیاده سازی و نگهداری مقایسه شده اند.

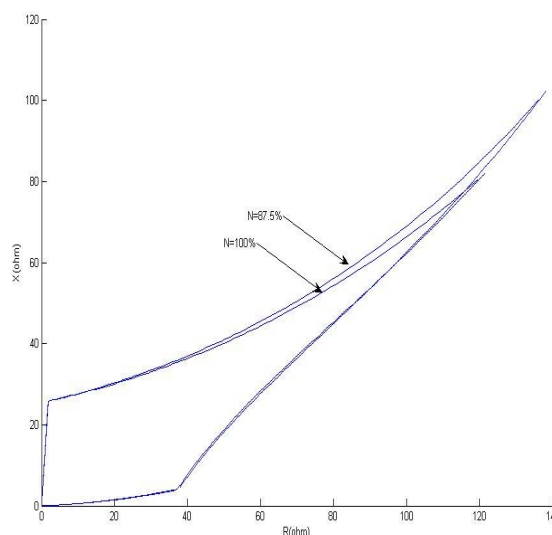
جدول (۱) مقایسه روشهای تطبیقی

| روش حفاظتی                           | هزینه پیاده سازی و نگهداری | قابلیت تطابق  | سرعت        | قابلیت اطمینان | قابلیت اجرا |
|--------------------------------------|----------------------------|---------------|-------------|----------------|-------------|
| مستقل                                | پایین                      | پایین         | بالا        | بالا           | بالا        |
| مبتنی بر کانالهای مخابراتی سرعت بالا | بالا                       | بالا          | بالا        | پایین          | پایین       |
| متمرکز سرعت پایین                    | متوسط                      | متوسط به شبکه | پایین       | متوسط          | متوسط       |
| روش پیشنهادی                         | نسبتاً پایین               | نسبتاً بالا   | نسبتاً بالا | متوسط          | بالا        |

#### ۵- نتیجه گیری

با توجه به شبیه سازی های انجام شده در این مقاله ملاحظه می-شود که نوسان متغیرهای مختلف در مزرعه بادی که به دلیل ماهیت غیرقابل کنترل بودن سرعت باد امری بدیهی است در مشخصه ی رله دیستانس تاثیر بسزایی دارند بطوریکه خطوط متصل به چنین مزارعی به روشهای سنتی قابل حفاظت نمی-باشند. در این مقاله یک طرح تطبیقی نسبتاً سریع مبتنی بر کانالهای مخابراتی سرعت پایین ارایه شده است. نتایج حاصله نشان می-دهد، ضمن اینکه این سیستم حفاظتی پاسخگوی تغییرات گسترده در شرایط ساختاری و بهره برداری شبکه مورد مطالعه می-باشد، نسبت به دیگر طرحهای تطبیقی ارایه شده عملیاتی تر می-باشد.

واحدهای موجود بر روی مشخصه ی رله بررسی می-شود (مطابق شکل (۱۰)). این بدان معنی است که در بازه ی زمانی که طول می-کشد اطلاعات از نیروگاه بادی به محل رله ارسال شود تقریباً چهار واحد از مدار خارج شوند.



شکل (۱۰) مشخصه رله به ازای امپدانسهای مختلف مزرعه بادی

در این شکل حالت اول مربوط به شرایطی است که کلیه ی واحدها در مدار قرار دارند و در حالت دوم ۱۲/۵ درصد از تعداد واحدها از مدار خارج شده و تنها ۸۷/۵ درصد از واحدها در تولید توان مشارکت دارند. ملاحظه می-شود که حتی با چنین تغییر گسترده در فاصله ی زمانی کم نیز میزان تغییرات در مشخصه ی رله کم و قابل چشم پوشی می-باشد.

#### ✓ امپدانس معادل باس نزدیک رله

بدلیل اینکه در این شیوه ی حفاظتی، از سیستم مخابراتی سلسله مراتبی و مدل امپدانس استفاده نمی-شود هرگاه کلیدزنی در شبکه رخ می-دهد امپدانس معادل سمت شبکه تغییر می-کند، در حالیکه مقدار آن قابل اندازه گیری و محاسبه نمی-باشد. بنابراین بایستی تاثیر این پارامتر را نیز بر روی مشخصه رله دیستانس بررسی نمود. در شکل (۵) این مشخصه به ازای مقادیر پیش-فرض و دو برابر شدن امپدانس منبع سمت شبکه نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می-شود تاثیر این پارامتر نیز در مشخصه ی رله بسیار ناچیز می-باشد.

مراجع:

- [1] P. J. Moore and A. T. Johns, "Performance of adaptive distance protection under high resistance earth faults", *cigre*, 1992.
- [2] L. Yang and A. G. Phadke, "An adaptive distance relay", 12<sup>th</sup> Power System Computation Conference, 1996.
- [3] Zh. Zhizhe and Ch. Deshu, "An adaptive approach in digital distance protection", IEEE, 1990.
- [4] Y. Q. Xia, K. K. Li, and A. K. David, "Adaptive relay setting for standalone digital distance protection," IEEE Trans. Power Del., vol. 9, no. 1, pp. 480–491, Jan. 1994.
- [5] S. Skok and A. Marusic, "The self-organizing neural network applied to adaptive distance protection", IEEE 2000.
- [6] Ch. Sh. Chen, F. R. Chang, Ch. W. Liu and J. J. C. Yu, "A new adaptive relaying schime for transmission line protection based on phasor measurment units", International Conference, Marbella, Spain, 2000.
- [7] L. Yinhong and D. Xianzhong, "A study on integrated adaptive relaying system for large-scale mixed power network" CCECE 2003-IEEE.
- [8] A. K. Pradhan, and G. Jo'os, "Adaptive distance relay setting for lines connecting wind farms", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 22, NO. 1, March 2007.
- [9] C. H. Jung, D.J. Shin and J. O. Kim, "Adaptive setting of digital relay for transmission line protection" IEEE, Seoul, 133-791, 2000.
- [10] S. Jamali, "A fast adaptive digital distance protection" in Power System Protection, Conference Publication No. 479 IEE 2001.
- [11] A. Y. Abdelaziz, "An adaptive protection scheme for optimal co-ordination of overcurrent relays", Electric Power Systems Research, 61(2002).
- [12] P. Sorensen, N. A. Cutululis, A. V. Rodriguez, L. Jensen, J. Hjerrild, M. H. Donovan and H. Madsen, "Power fluctuations from large wind farms", IEEE Trans., vol. 22, no. 3, August 2007

ضمیمه (الف): محاسبه امپدانس دیده شده توسط

رله در خطای تکفاز به زمین با استفاده از شبکه های

توالی

در صورتیکه  $n$  فاصله ی خطا نسبت به محل رله باشد و  $Z_{1L}$  و  $Z_{0L}$  امپدانسهای توالی مثبت و صفر خط باشند داریم:

$$Z_{1M} = Z_{1SM} + Z_{1LM} \quad (۷)$$

$$Z_{0M} = Z_{0SM} + Z_{0LM} \quad (۸)$$

و

$$Z_{1N} = Z_{1SN} + Z_{1LN} \quad (۹)$$

$$Z_{0N} = Z_{0SN} + Z_{0LN} \quad (۱۰)$$

زیرنویس  $M$  مربوط به امپدانسهای توالی سمت شبکه می باشد و زیرنویس  $N$  امپدانسهای توالی سمت مزرعه بادی را نشان می دهد.

که  $Z_{1LN} = (1-n)Z_{1L}$  و  $Z_{1LM} = nZ_{1L}$  و روابط مشابهی برای مولفه های توالی صفر نیز برقرار می باشد. زیرنویس  $S$  مربوط به پارامترهای منبع و زیرنویس  $L$  مربوط به پارامترهای خط می باشد. فرض شده است که در همه ی المانها امپدانس توالی مثبت با امپدانس توالی منفی برابر باشد. ولتاژ پیش از خطای فاز  $A$  در نقطه  $F$  بصورت زیر محاسبه می شود.

$$V_{AF} = E_{AM} - I_{AM} Z_{1M} \quad (۱۱)$$

برای خطای فاز  $A$  به زمین جریانهای توالی در مقاومت خطا بصورت زیر می باشند:

$$I_{1F} = I_{2F} = I_{0F} = \frac{V_{AF}}{Z_{sum} + 3R_F} \quad (۱۲)$$

$Z_{sum}$  مجموع امپدانسهای توالی مثبت، منفی و صفر شبکه ی توالی هستند. جریانهای توالی حین خطا در محل رله بصورت زیر می باشد:

$$I_{1M} = I_{2M} = D_1 I_{1F} \quad (۱۳)$$

$$I_{0M} = D_0 I_{0F} \quad (۱۴)$$

ضرایب توزیع بصورت زیر تعریف می شوند:

$$D_1 = \frac{Z_{1N}}{Z_{1M} + Z_{1N}} \quad (۱۵)$$

$$D_0 = \frac{Z_{0N}}{Z_{0M} + Z_{0N}} \quad (۱۶)$$

ولتاژ و جریان در محل رله در حین خطا  $V_{AM}$  و  $I_{AM}$  با استفاده از روابط فوق قابل محاسبه می باشد. امپدانس ظاهری فاز A در نقطه M عبارتست از:

$$Z_A = \frac{V_{AM}}{I_{AM} + K_0 I_{0M}} \quad (۱۷)$$

که ضریب جبران سازی توالی صفر بصورت زیر تعریف می شود.

$$K_0 = \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{Z_{1L}} \quad (۱۸)$$

معادله (۱۷) را می توان بصورت زیر خلاصه نمود.

$$Z_A = nZ_{1L} + \frac{3R_F}{D_D + 2D_1 + D_0(1 + K_0)} \quad (۱۹)$$

$$D_D = (3R_F + Z_{sum}) \frac{1 - \rho.e^{-j\delta}}{Z_{1N} + (\rho.e^{-j\delta})Z_{1M}} \quad (۲۰)$$

#### ضمیمه (ب): اطلاعات شبکه مورد مطالعه

در ذیل اطلاعات مربوط به شبکه ی قدرت مورد مطالعه آمده است. امپدانسه های توالی منفی با امپدانسه های توالی مثبت برابرند.

امپدانسه های توالی منبع مزرعه بادی:

$$\begin{aligned} Z_{1SN} &= 20e^{85j} \Omega \\ Z_{0SN} &= 20e^{85j} \Omega \end{aligned}$$

امپدانسه های توالی منبع معادل شبکه:

$$\begin{aligned} Z_{1SN} &= 1e^{85j} \Omega \\ Z_{0SN} &= 1.50e^{85j} \Omega \end{aligned}$$

امپدانسه های توالی خط انتقال:

$$\begin{aligned} Z_{1SN} &= 28.75e^{86j} \Omega \\ Z_{0SN} &= 87.35e^{83j} \Omega \end{aligned}$$