



طرح حفاظت تطبیقی برای ریز شبکه های هوشمند دارای منابع انرژی تجدید پذیر

عبدالرضا قلی پور

شرکت توزیع نیروی برق تهران بزرگ
دانشجوی دکتری برق قدرت دانشگاه شاهد
arezagholipour@gmail.com

مهدی اخباری

استادیار دانشگاه شاهد
akhbari@shahed.ac.ir

چکیده

شرکت های توزیع برق، وظیفه تامین انرژی مشترکین برق را بر عهده دارند. تامین برق پایدار برای مشترکین همواره از اولویت های شرکت های توزیع برق بوده و سالیانه سرمایه گذاری زیادی در خصوص افزایش قابلیت اطمینان برق تحویلی به مشترکین، از طرف شرکت های توزیع صورت می گیرد. یکی از راهکاری های افزایش قابلیت اطمینان استفاده از مولدهای تولید پراکنده می باشد. ریز شبکه ها با استفاده از انواع مولدهای تولید پراکنده، بخصوص منابع انرژی تجدید پذیر، می توانند با قابلیت کارکرد در حالت جزیره ای و متصل به شبکه اصلی، تاثیر بسزایی در بهبود شاخص های قابلیت اطمینان داشته باشند. مولدهای انرژی تجدید پذیر به دلیل داشتن اثرات مثبت در کاهش آلودگی های زیست محیطی در دو دهه اخیر با استقبال زیادی از طرف کشورهای جهان مواجه شده است. با توجه به حضور انواع منابع تولید پراکنده در ریز شبکه، حفاظت این شبکه ها پیچیده تر از شبکه های توزیع دارای مولدهای سنکرون بوده و میبایست اثرات این مولدها در موضوع حفاظت به دقت مورد بررسی قرار گیرد. هماهنگی حفاظتی در ریز شبکه ها یک مساله غیر خطی بوده و اغلب با استفاده از الگوریتم های ابتکاری و یا سایر روش های حل مسائل خطی و غیر خطی، انجام می گیرد. در این مقاله مساله هماهنگی حفاظتی مورد بحث قرار گرفته و روشی جدید جهت هماهنگی رله ها پیشنهاد می گردد. نتایج شبیه سازی ها نشان داده شده است که هماهنگی حفاظتی مناسبی برای انواع خطاهای رخ داده در سطح شبکه بین رله های اصلی و پشتیبان وجود دارد. وجود هماهنگی حفاظتی، قابلیت اطمینان برق مشترکین تغذیه شونده در سطح ریز شبکه را افزایش می دهد. شبیه سازی ها با استفاده از نرم افزارهای DigSilent و GAMS انجام شده است.

واژگان کلیدی: ریز شبکه، حفاظت تطبیقی، منابع انرژی تجدید پذیر، هماهنگی حفاظتی، رله اضافه جریان



۱. مقدمه

ریزشبکه ها امروزه جز مسائل تحقیقاتی روز در بخش مطالعات مربوط به شبکه های هوشمند و شبکه های توزیع می باشند. به دلیل حضور منابع تولید پراکنده سنکرون و غیر سنکرون در سطح ریز شبکه های امروزی، مدیریت این شبکه ها از نظر مدیریت و کنترل، حفاظت و قابلیت اطمینان از اهمیت زیادی برخوردار بوده و امروزه مطالعات زیادی در این حوزه ها انجام می گیرد. مولدهای انرژی تجدید پذیر به دلیل داشتن اثرات مثبت در کاهش آلودگی های زیست محیطی در دو دهه اخیر با استقبال زیادی از طرف کشورهای جهان مواجه شده است. با توجه به حضور انواع منابع تولید پراکنده در ریز شبکه، حفاظت این شبکه ها پیچیده تر از شبکه های توزیع دارای مولدهای سنکرون بوده و می بایست اثرات این مولدها در موضوع حفاظت به دقت مورد بررسی قرار گیرد. همچنین حفاظت ریز شبکه ها در حضور مولدهای تولید پراکنده به دلیل تغذیه دو سویه مدارها، پیچیده تر از حفاظت شبکه های توزیع کلاسیک، که صرفاً شبکه های شعاعی بودند، می باشد و می بایست طرح حفاظتی با محاسبات و دقت نظر بیشتری صورت گیرد [۱]. ایجاد هماهنگی حفاظتی در ریز شبکه ها در سال های اخیر مورد مطالعه قرار گرفته و مطالعات مختلفی در این حوزه صورت گرفته است. در [۲-۱] با استفاده از FCL^۱ و استفاده از رله های با قابلیت تنظیم در چند مد کاری حفاظت تطبیقی مناسبی جهت حفاظت ریز شبکه پیشنهاد داده شده است. در [۳] با مطالعه روی خطای های فازی مختلف سه فاز، فاز به فاز و دو فاز به زمین در ترکیب های مختلف ریز شبکه طرح حفاظتی با قابلیت اطمینان بالا برای ریز شبکه ۹ باس IEEE، صورت گرفته است. ریز شبکه های حلقوی نیز به موازات ریز شبکه های شعاعی مورد مطالعه قرار گرفته و در [۴-۵] با مطالعه روی خطای های فازی مختلف سه فاز، در ترکیب های اتصال به شبکه و عملکرد جزیره ای ریز شبکه طرح حفاظتی با قابلیت اطمینان بالا برای ریز شبکه شعاعی و حلقوی و با استفاده از FCL، طرح حفاظتی مناسبی

جهت ایجاد هماهنگی حفاظتی پایدار در ریز شبکه ها، مورد مطالعه قرار گرفته است. [۶-۷] اثرات منابع تولید پراکنده در شبکه های توزیع و شبکه های توزیع حلقوی را مورد مطالعه قرار داده و هماهنگی حفاظتی قابل کاربرد در این مدل شبکه ها را پیشنهاد و شاخص ها هماهنگی حفاظتی در این خصوص تدوین نموده است. در [۸] رفتار مولدهای تولید پراکنده اینورتری در بحث حفاظت ریز شبکه ها مورد مطالعه قرار گرفته است. [۹] با استفاده از رله های دیجیتال هماهنگی حفاظتی تطبیقی برای ریز شبکه ها پیشنهاد داده شده، به گونه ای که تپولوژی ریز شبکه در هر حالت تشخیص داده شده و حفاظت موثری در هر تپولوژی ریز شبکه، توسط رله های اضافه جریان صورت می گیرد. در اکثر مطالعات انجام گرفته در زمینه هماهنگی حفاظتی ریز شبکه ها، مولدهای تولید پراکنده ماشین سنکرون کلاسیک^۲ CSG در نظر گرفته شده است. در این مقاله با لحاظ نمودن مولدهای تجدیدپذیری که با استفاده از اینورتر به شبکه متصل می شوند، مدل دقیق تری از ریز شبکه های امروزی مورد مطالعه قرار می گیرد. همچنین در اکثر مطالعات گذشته با تعیین مقادیر جریان تنظیمی و TMS^۳ رله های اضافه جریان، هماهنگی حفاظتی انجام گرفته است. در این مقاله اثرات مولدهای تجدید پذیر در تزریق جریان اتصال کوتاه به سمت نقطه خطا مورد بررسی قرار گرفته و جریان تنظیمی رله ها برابر جریان پخش بار گذرنده از رله ها در نظر گرفته شده و با تعیین مقادیر TMS رله ها، هماهنگی حفاظتی انجام می گیرد. در بخش های بعدی مدلسازی ریاضی مساله هماهنگی حفاظتی، شبیه سازی و نتیجه گیری آمده است.

۲. فرمول بندی مساله هماهنگی حفاظتی

زمان عملکرد رله اضافه جریان تابعی معکوس از جریان اتصال کوتاه گذرنده از آن است. این تابع با دو پارامتر TMS رله، یک پارامتر تنظیم، و جریان پیکاپ I_p می باشد. که برابر کمترین جریانی است که برابر

^۱Conventional Synchronous Generators

^۲Time Multiplier Setting

^۳Fault Current Limiter

$$t_{cij}^k - t_{cij}^p \geq CTI \quad \forall c, i, \{j, k\} \quad (3)$$

Ip و TMS معمولاً توسط کارخانه سازنده رله داده می شود و مقدار Ip معمولاً بیش از جریان نامی رله هست و قید زیر را برای آن خواهیم داشت. جریان نامی رله برابر جریان پخش بار هر رله در این مطالعه لحاظ شده است.

$$I_{pi-\min} \leq I_{pi} \leq I_{pi-\max}, \forall i \quad (4)$$

همچنین برای TMS داریم:

$$TMS_{i-\min} \leq TMS_i \leq TMS_{i-\max}, \forall i \quad (5)$$

TMS مینیمم و ماکزیمم هر رله، معمولاً بین ۰,۵ تا ۱ در شبیه سازی ها لحاظ می گردد.

مساله ای ما بدین صورت خواهد بود که TMS_i برای هر رله به ازای خطای رخ داده در مکان i ، معین می شود. به گونه ای که به ازای همه خطاهای رخ داده رله های اصلی و رله های پشتیبان در هر حالت خطا بصورت هماهنگ عمل نمایند.

۳. مدلسازی مولدهای تجدید پذیر اینورتری

مطالعات نشان داده است مولدهای تجدید پذیری که با استفاده از اینورتر به شبکه متصل می شوند، به دلیل وجود سیستم محدودساز جریان در مدار کنترل اینورتر، حین اتصال کوتاه جریان کمتری نسبت به ژنراتورهای سنکرون کلاسیک، به سمت نقطه خطا تزریق می کنند. معمولاً مولدهای اینورتری در حدود ۱ الی ۲,۵ برابر جریان نامی اینورتر حین خطا جریان تزریق می کنند [۲]، در حالیکه این میزان برای ژنراتورهای سنکرون کلاسیک تا ۶ برابر جریان نامی، می باشد. در مد متصل به شبکه، اینورتر توان اکتیو و راکتیو شارش شده به شبکه را کنترل می کند. در مد متصل به شبکه کنترل ولتاژ و فرکانس از عملکردهای اصلی سیستم کنترل اینورتر می باشد. شکل (۱) مدل کنترلی ساده از سیستم های اینورتری را نشان می دهد.

تحریک رله می گردد. تابع ریاضی مذکور به صورت زیر تعریف می شود [۲]:

$$t = TMS \times \frac{A}{\left(\frac{I_{sc}}{I_b}\right)^B - 1} \quad (1)$$

ثابت های A و B برحسب رله مورد استفاده تغییر می کنند و بر اساس نوع منحنی مشخصه رله تعیین می گردند. در جدول (۱) مقادیر این ثابت ها بر حسب منحنی مشخصه آمده است. در این مقاله از نوع منحنی معمولی استفاده می گردد.

جدول (۱): ضرایب منحنی مشخصه

نوع منحنی	A	B
معمولی	۰,۱۴	۰,۰۲
بسیار معکوس	۱۳,۵	۱
بی نهایت معکوس	۸۰	۲

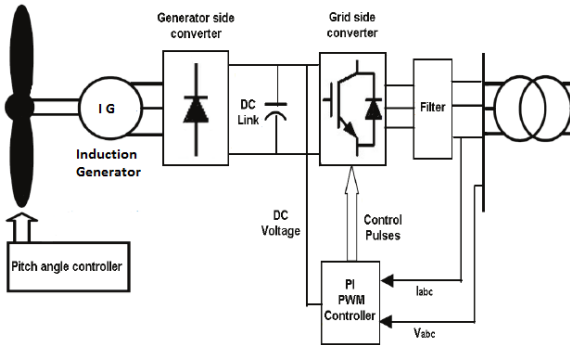
هدف از هماهنگی حفاظتی مینیمم کردن زمان هماهنگی رله هاست. طوریکه شرایط هماهنگی حفاظتی هم در شرایط اتصال به شبکه و هم در شرایط جزیره ای همچنان حفظ گردد. T مجموع زمان هماهنگی کل رله ها بوده و می بایست مینیمم گردد. لذا تا بعی هدفی به صورت زیر جهت حل مساله هماهنگی حفاظتی تعریف می گردد [۲]:

$$Min T = \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (t_{cij}^p + \sum_{k=1}^K t_{cij}^k) \quad (2)$$

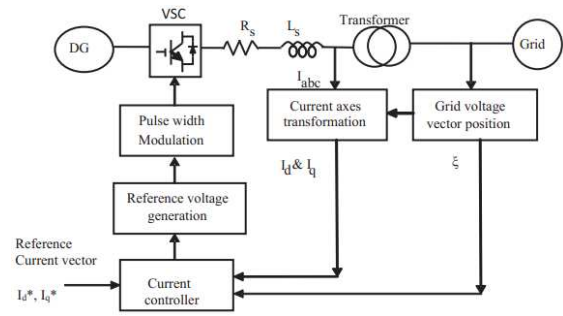
طوریکه c معرف توپولوژی سیستم، C تعداد آرایش شبکه در نظر گرفته شده جهت مطالعه، i معرف مکان خطا، N تعداد نقاطی است که خطا روی آن رخ می دهد. J معرف رله هست. M معرف کل رله هاست. p بیانگر رله اصلی و b_k بیانگر رله پشتیبان برای رله k می باشد. K تعداد رله های پشتیبان برای هر رله اصلی است. برای کمینه شدن زمان باید فاصله عملکردی بین رله اصلی و رله پشتیبان کم باشد. این فاصله CTI^f نامیده می شود و باید تا اندازه ای باشد که تداخل عملکردی بین رله اصلی و پشتیبان پیش نیاید. معمولاً CTI در حدود ۰,۲ ثانیه فرض می شود. لذا داریم:

^fCoordination Time Interval

VSC^۵، به برق AC تبدیل شده و توسط ترانسفورماتور افزایش داده، به ریز شبکه متصل می گردد. شکل (۲) بلوک دیگرام نیروگاه بادی از این نوع را نشان می دهد. در کتابخانه نرم افزار DigSilent مدل استاندارد نیروگاه بادی تعریف شده است. نقطه اتصال نیروگاه بادی به ریز شبکه، در شکل (۴) در بخش بعد نشان داده شده است.



شکل (۲): بلوک دیگرام نیروگاه بادی از نوع ژنراتور القایی



شکل (۱): مدل کنترلی ساده از سیستم های اینورتری [۸]

مدلسازی مولدهای تجدید پذیر، جهت مطالعه رفتار آنها در شبکه، از اهمیت خاصی برخوردار است. احداث و استفاده از نیروگاه های بادی و خورشیدی در اکثر کشورها خصوصاً کشور ما ایران، به وفور در سال های اخیر گسترش یافته است. بخش بعد به مدلسازی ریاضی این نوع مولدهای تجدید پذیر، اختصاص یافته است.

۳.۲ مدلسازی سیستم انرژی خورشیدی

یک سلول خورشیدی می تواند به صورت یک مدار معادل الکتریکی که شامل یک منبع جریان و یک دیود معکوس موازی می باشد، مطابق شکل (۳) مدل گردد. اگر سلول خورشیدی در برابر نور خورشید قرار گیرد I_{sh} تولید می گردد و مقدار آن با تغییر تابش نور تغییر می کند. معادله اصلی که مشخصه I-V یک سلول خورشیدی را بیان می کند بصورت زیر است:

$$I = I_{sc} - I_D - I_{sh} \quad (9)$$

$$I_{sc} = I_{scR} \frac{G}{G_R} [1 + \alpha_T (T_c - T_{cR})] \quad (10)$$

$$I_D = I_s e^{\left(\frac{V + IR_{sr}}{nkT_c/q}\right) - 1} \quad (11)$$

$$I_{sh} = \left(\frac{V + IR_{sr}}{R_{sh}}\right) \quad (12)$$

$$I_s = I_{sR} \left(\frac{T_c^s}{T_{cR}^s}\right) e^{\left(\frac{1}{T_{cR}} - \frac{1}{T_c}\right) \frac{qE_g}{nk}} \quad (13)$$

طوریکه I_{sc} جریان نوری بوده و تابع تابش نور خورشید به سطح سلول خورشیدی G و حرارت سلول T_c می باشد. I_{scR} جریان اتصال کوتاه در تابش خورشیدی مرجع

۳.۱ مدلسازی نیروگاه بادی

از نظر تئوری توان تولیدی یک نیروگاه بادی با رابطه زیر بیان می شود [۸]:

$$P_m = 0.5 \times \rho \times C_p \times S \times W_s^3 \quad (6)$$

طوریکه P_m توان توربین بادی، ρ چگالی باد (1.22 kg/m^3)، W_s سرعت باد (m/s)، S سطح روتور (m^2)، C_p ضریب ثابتی است که نسبت توان ارسالی از طریق اینورتر به شبکه به توان مکانیکی توربین بادی را بیان می کند.

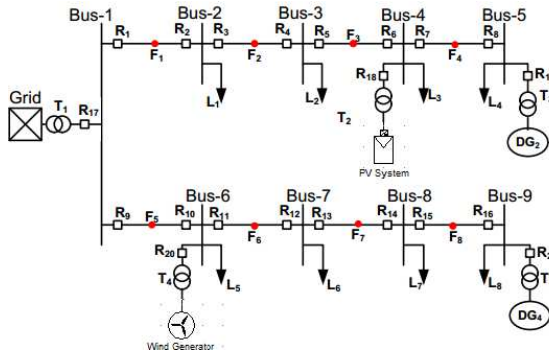
$$C_p = P_{real} / P_m \quad (7)$$

$$C_p = 1/2(1 - \alpha^2)(1 + \alpha) \quad (8)$$

که α نسبت سرعت باد در پشت روتور به سرعت توربین باد در جلوی روتور بیان می شود. باد ورودی به توربین بادی اعمال شده و در نتیجه، گشتاور مکانیکی توسط توربین ایجاد می شود. گشتاور مکانیکی به موتور القایی اعمال شده و توان الکتریکی حاصل می شود. توان الکتریکی توسط یکسوساز به برق DC تبدیل می شود. برای نگه داشتن ولتاژ لینک DC در حد قابل قبول، خازنی با اندازه مناسب به صورت موازی به لینک DC متصل می گردد، تا در حدود ۱ ثانیه بتواند افت ولتاژ خروجی ژنراتور بادی را جبران نماید. ولتاژ DC توسط

^۵Voltage Source Converter

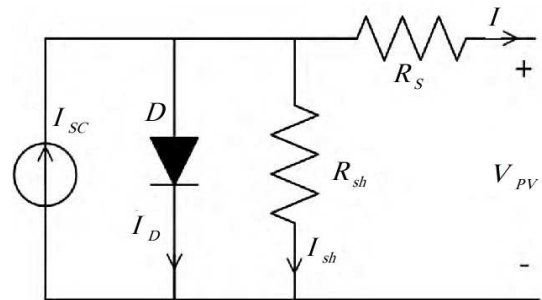
(۱) ملاحظه می گردد شبکه مورد مطالعه دارای ۹ باس و ۲۱ رله حفاظتی می باشد. همچنین در این شبکه ۸ بار نیز که به ترتیب از Load 1 تا Load 8 نامگذاری شده اند به شبکه متصل شده اند.



شکل (۴): دیاگرام تک خطی شبکه ۹ باسه شعاعی IEEE

دیاگرام تک خطی شبکه در نرم افزار DigSilent در شکل (۵) نشان داده شده است. هنگام شبیه سازی در نرم افزار DigSilent مولدهای تولید پراکنده در مد جزیره ای بصورت P-V به شبکه متصل شده و یکی از ژنراتورها بعنوان ژنراتور مرجع تعیین می شود. در مد متصل به شبکه بصورت P-V به شبکه متصل شده و شبکه اصلی به عنوان مرجع انتخاب می شود. اتصال کوتاه نیز همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است در وسط خطوط در سطح ریز شبکه انجام می گیرد. در حالت جزیره ای رله R17 در هماهنگی حفاظتی لحاظ نمی گردد. در این مطالعه برای هر رله، یک یا دو رله پشتیبان در نظر گرفته می شود. به عنوان مثال برای خطای گره مجازی F1، رله های R9 و R10 رله اصلی می باشند. رله پشتیبان رله R9 رله های R17 و R2 می باشند و رله پشتیبان رله R10 رله های R12 و R20 می باشند. در جدول نتیجه گیری رله های اصلی با PR و رله های پشتیبان با BU نشان داده می شود. پس از انجام پخش بار و سپس انجام اتصال کوتاه در وسط خطوط، جریان عبوری از هر رله کاملاً مشخص شده و می توان از اطلاعات جریانی به دست آمده نسبت به بهینه سازی تابع هدف و تعیین TMS هر رله، اقدام نمود. جهت بهینه سازی در این مقاله از نرم افزار GAMS، استفاده می گردد. فلوجارت

G_R و حرارت سلول مرجع T_{cR} ، می باشد. T_{cR} و G_R شرایط تست استاندارد STC^۶ نامیده می شوند. ضریب حرارتی جریان نوری تولید شده توسط سلول خورشیدی می باشد. I_s در معادله (۱۱)، جریان اشباع نامیده شده و تنها تابعی از حرارت سلول می باشد. I_{sR} در معادله (۱۳)، جریان اشباع در حرارت مرجع استاندارد می باشد. کلیه ضرایب در معادلات (۹)–(۱۳)، از کاتالوگ سازنده سلول خورشیدی قابل دسترس می باشد. یک آرایه PV، بصورت اتصال سری - موازی سلول ها، مدل می گردد. مدار یک تک سلول خورشیدی، می تواند جهت نمایش رفتار آرایه سری - موازی سلول ها، تعمیم داده شود. خروجی سیستم PV^۷ به اینورتری که به ریز شبکه از طریق یک ترانسفورماتور افزایشده متصل است، داده می شود. در کتابخانه نرم افزار DigSilent مدل استاندارد سیستم خورشیدی تعریف شده است.



شکل (۳): مدل مداری ساده یک سلول خورشیدی

۴. شبکه مورد مطالعه

در شکل (۴) دیاگرام تک خطی شبکه ۹ باسه شعاعی IEEE، مورد مطالعه نمایش داده شده است [۳]. این شبکه از دو فیذر شعاعی تشکیل شده که توسط یک شبکه اصلی، ۲ واحد تولید پراکنده از نوع CHP^۸، یک نیروگاه بادی و یک مولد خورشیدی تغذیه می شود. نیروگاه بادی و خورشیدی توسط اینورتر به شبکه متصل شده اند. در جدول (۲) نیز اطلاعات مربوط به تجهیزات این شبکه در قالب یک جدول بیان شده است. همانگونه که در شکل

^۶Standard Test Condition

^۷Photovoltaic

^۸Combined Heat and Power



ساز داده می شود و پس از آن اطلاعات جریان های پخش بار شبکه و اتصال کوتاه بین خطوط در هر حالت خطا دریافت شده به رله های متناظر هر حالت خطا، نگاشت می گردد. سپس TMS های بهینه رله ها توسط MIP Solver، در نرم افزار GAMS، پس از تکرار حل های متوالی، به دست می آید. تکرار حل مساله تا رسیدن به مقدار مینیمم تابع هدف، که شامل جمع زمان عملکرد کلیه رله های اصلی و پشتیبان در هر حالت عملکردی است، ادامه می یابد. نتایج حاصله برای TMS رله ها بصورت جداگانه برای عملکرد جزیره ای و عملکرد متصل به شبکه ذخیره می گردد.

۶. نتایج شبیه سازی

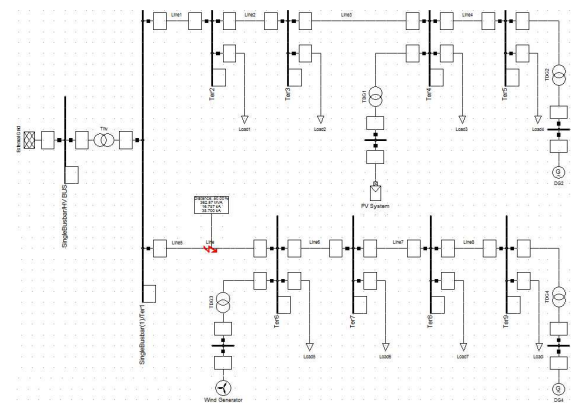
۶.۱. مد کارکرد جزیره ای

نتایج شبیه سازی در جداول (۳) تا (۶) برای حالت عملکرد جزیره ای آمده است. جدول (۳) جریان پخش بار رله ها، جدول (۴) جریان اتصال کوتاه رله ها، جدول (۵) TMS بهینه رله ها، جدول (۶) زمان عملکرد رله ها در مد جزیره ای را شامل می شوند. با توجه به زمان عملکرد رله های اصلی و زمان عملکرد رله های پشتیبان مشخص است که هماهنگی حفاظتی با CTI حدود ۲۰۰ میلی ثانیه بین رله های متناظر در هر حالت خطای اتصال کوتاه برقرار است و این هماهنگی حفاظتی دقیق قابلیت اطمینان ریز شبکه را بهبود می بخشد و با ایزوله شدن خط معیوب شاخص های قابلیت اطمینان برق مشترکین تغذیه شونده از ریز شبکه بالا می رود. در صورت نبود چنین هماهنگی حفاظتی بین رله های متناظر بخش وسیعی از سطح ریز شبکه ممکن در حین خطای اتصال کوتاه بی برق گردد. جریان I_p رله ها برابر جریان پخش بار گذرنده از رله ها در این مقاله لحاظ شده است.

پیشنهادی مساله هماهنگی بهینه رله ها در ریز شبکه، با استفاده از نرم افزار GAMS در بخش بعدی آمده است.

جدول (۲): اطلاعات شبکه ۹ باسه شعاعی

مدل تجهیز	اسم تجهیز	پارامترهای تجهیز مورد نیاز				
		اسم تجهیز	Short circuit power	X/R ratio	Voltage set point	Angle
شبکه اصلی	For external Grid	500MVA	۶	1 Pu	۰	
		Rated voltage	Rated current	Resistance	Reactance X	Long
خطوط انتقال	For all lines	12.47 kv	0.49 Ka	0.1529 ohm/km	0.1406 ohm/km	500 m
		Nominal power	Nominal voltage	Power factor	Stator resistance (Xd) for CSG	
مولدها	For all DGs	5MVA	0.48KV	۰.۸	0.1 Pu	
		مشخصات	Rated power	Nominal frequency	LV	HV
تراانسفورماتور	T ₁ T ₂ , T ₃ , ..., T ₅	20 MVA	50 Hz	12.47 kv	115 Kv	
		5 MVA	50 Hz	0.48KV	12.47 kv	
بار الکتریکی	For all loads	Apparent power	Power factor	Balanced		
		2 MVA	0.9 lag	Ok		



شکل (۵): دیاگرام تک خطی شبکه در نرم افزار DigSilent

۵. فلوجارت پیشنهادی مساله هماهنگی بهینه

رله ها در ریز شبکه

فلوجارت دستیابی به مقادیر بهینه تنظیمات رله ها در شکل (۶) نشان داده شده است. ابتدا رله های اصلی و پشتیبان در هر حالت خطا معین شده و به نرم افزار بهینه



جدول (۴): جریان اتصال کوتاه رله ها در مد جزیره ای (A)

محل خطا	PR1	PR2	BU1	BU2	
F1	R1	R2	R10	R4	
	1735	1759	1735	1759	
F2	R3	R4	R1	R6	
	1705	1791	1705	1791	
F3	R5	R6	R3	R8	R18
	1690	1807	1690	1105	702
F4	R7	R8	R5	R18	R19
	2361	1112	1669	694	1112
F5	R9	R10	R2	R12	R20
	1728	1766	1728	1071	696
F6	R11	R12	R9	R20	R14
	2384	1087	1692	694	1087
F7	R13	R14	R11		R16
	2327	1099	2327		1099
F8	R15	R16	R13		R21
	2272	1112	2272		1112

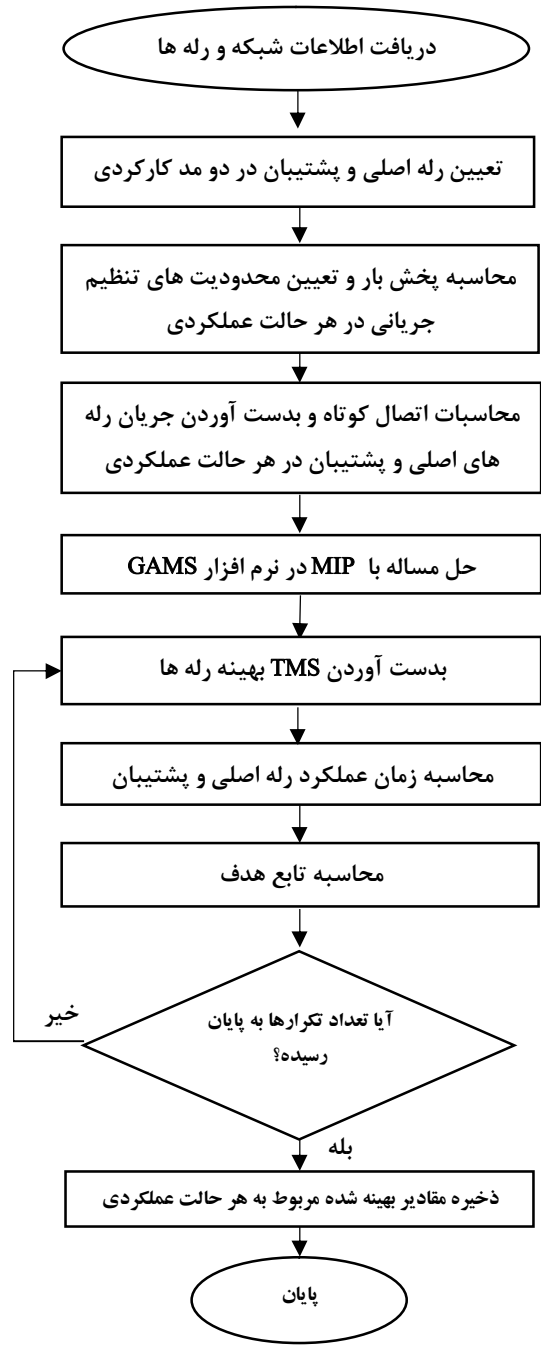
جدول (۵): TMS بهینه رله ها در مد کارکرد جزیره ای

TMS	REL	TMS	REL	TMS	REL	TMS	REL
0.521	R16	0.235	R11	0.413	R6	0.541	R1
0.259	R18	0.38	R12	0.05	R7	0.698	R2
0.432	R19	0.253	R13	0.545	R8	0.209	R3
0.444	R20	0.904	R14	0.543	R9	0.462	R4
0.418	R21	0.05	R15	0.697	R10	0.094	R5

با توجه به زمان عملکرد رله ها در مد جزیره ای در جدول (۶) مشخص است زمان عملکرد رله ها در تابع هدف جمعا در حدود ۳۴,۸۸۸ ثانیه می باشد.

۶.۲ مد کارکرد متصل به شبکه

نتایج شبیه سازی در جداول (۷) تا (۱۰) برای حالت متصل به شبکه آمده است. جدول (۷) جریان پخش بار رله ها، جدول (۸) جریان اتصال کوتاه رله ها، جدول (۹) TMS بهینه رله ها، جدول (۱۰) زمان عملکرد رله ها در مد متصل به شبکه را شامل می شوند. با توجه به زمان عملکرد رله های اصلی و زمان عملکرد رله های پشتیبان مشخص است که هماهنگی حفاظتی با CTI حدود ۲۰۰ میلی ثانیه بین رله های متناظر در هر حالت خطای اتصال کوتاه برقرار است. مقایسه مدت زمان عملکرد رله ها نشان می دهد به دلیل حضور شبکه اصلی در این حالت رله های سمت شبکه اندکی سریعتر عمل می کنند.



شکل (۶): فلوچارت دستیابی به مقادیر بهینه TMS رله ها

جدول (۳): جریان پخش بار رله ها در مد جزیره ای

In(A)	REL	In(A)	REL	In(A)	REL	In(A)	REL
100	R16	100	R11	200	R6	10	R1
210	R18	100	R12	90	R7	10	R2
190	R19	10	R13	90	R8	100	R3
210	R20	10	R14	10	R9	100	R4
200	R21	100	R15	10	R10	200	R5



جدول (۸): جریان اتصال کوتاه رله ها در مد متصل به شبکه (A)

محل خطا	PR1	PR2	BU1		BU2
F1	R1	R2	R10	R17	R4
	14299	1759	1626	12679	1759
F2	R3	R4	R1		R6
	12408	1791	12408		1791
F3	R5	R6	R3		R8 R18
	11605	1807	11605		1105 702
F4	R7	R8	R5	R18	R19
	11491	1112	10847	656	1112
F5	R9	R10	R2	R17	R12 R20
	14292	1766	1619	1619	1071 696
F6	R11	R12	R9	R20	R14
	13010	1087	12362	653	1087
F7	R13	R14	R11		R16
	11344	1099	11344		1099
F8	R15	R16	R13		R21
	10011	1112	10011		1112

جدول (۶): زمان عملکرد رله ها در مد جزیره ای (S)

محل خطا	PR1	PR2	BU1		BU2
F1	R1	R2	R10		R4
	0.698	0.897	0.898		1.097
F2	R3	R4	R1		R6
	0.500	1.090	0.700		1.290
F3	R5	R6	R3		R8 R18
	0.302	1.284	0.502		1.484 1.484
F4	R7	R8	R5	R18	R19
	0.104	1.481	0.304	1.499	1.681
F5	R9	R10	R2		R12 R20
	0.700	0.895	0.900		1.095 2.566
F6	R11	R12	R9	R20	R14
	0.503	1.088	0.703	0.703	1.288
F7	R13	R14	R11		R16
	0.307	1.284	0.507		1.484
F8	R15	R16	R13		R21
	0.109	1.477	0.309		1.677
Ttotal=34.888 s					

جدول (۹): TMS بهینه رله ها در مد متصل به شبکه

TMS	REL	TMS	REL	TMS	REL	TMS	REL
0.492	R16	0.317	R11	0.394	R6	0.475	R1
0.539	R17	0.324	R12	0.05	R7	0.341	R2
0.264	R18	0.227	R13	0.513	R8	0.324	R3
0.409	R19	0.589	R14	0.494	R9	0.41	R4
0.2	R20	0.05	R15	0.371	R10	0.162	R5
0.41	R21	R17 در مد متصل به شبکه عملکرد دارد.					

جدول (۷): جریان پخش بار رله ها در مد متصل به شبکه

In(A)	REL	In(A)	REL	In(A)	REL	In(A)	REL
100	R16	120	R11	190	R6	100	R1
170	R17	120	R12	90	R7	100	R2
190	R18	40	R13	90	R8	110	R3
190	R19	40	R14	80	R9	110	R4
190	R20	100	R15	80	R10	190	R5
190	R21	R17 در مد متصل به شبکه عملکرد دارد.					

تنظیم دوگانه^۱ باشند، تا بتوان در دو مد کارکردی رله‌ها را تنظیم نمود. به محض ارسال سیگنال تریپ R17 به مرکز کنترل ریز شبکه^۱ MCC، رله‌ها در مد جزیره‌ای عملکرد خواهند داشت و قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی مورد قبول خواهد بود. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد با تنظیم رله‌ها در هر مد کارکردی هماهنگی حفاظتی مناسبی بین رله‌های متناظر اصلی و پشتیبان در هر حالت خطای اتصال کوتاه برقرار است و به محض وقوع اتصال کوتاه به سرعت خط معیوب از شبکه سالم جدا شده و سرویس‌رسانی به کل مشترکین ریز شبکه همچنان پایدار خواهد بود. یکی از مزایای ریز شبکه‌ها تامین برق پایدار به مشترکین حساس امروزی است، که تقاضای تامین برق پایدار و بی‌وقفه را از شرکت‌های توزیع نیروی برق را دارند. تامین برق پایدار، سیستم حفاظتی مقاوم و هوشمندی را می‌طلبد که با هر تغییر در پیکره شبکه، بتواند عملکرد درستی را از خود ارائه دهد.

۷. نتیجه‌گیری

با تغییر مد کاری ریز شبکه از حالت متصل به شبکه به حالت کارکردی جزیره‌ای سطح جریان‌های اتصال کوتاه تغییر می‌کنند. لذا ضروری است رله‌های اضافه‌جریان مطابق با شرایط جدید جریان‌های پخش بار و اتصال کوتاه باز تنظیم شوند. با توجه به این امر که مولدهای تولید پراکنده اینورتری در تزریق میزان جریان اتصال کوتاه به سمت نقطه خطا نسبت به مولدهای سنکرون ضعیف‌تر می‌باشند، حفاظت تطبیقی در این شرایط، مطابق با تغییر توپولوژی شبکه، می‌تواند راهکاری مطمئن در ارائه راهکارها و طرح‌های حفاظتی باشد. با تغییر مد رله‌ها در زمان دریافت سیگنال جدا شدن ریز شبکه از شبکه اصلی، حفاظت دقیق تری در سطح ریز شبکه صورت می‌گیرد و برق مشترکین تغذیه‌شونده از ریز شبکه، از شاخص‌های قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار خواهد بود. پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی در این زمینه عدم قطعیت‌های تولید و بار، بهتر است در ارائه

جدول (۱۰): زمان عملکرد رله‌ها در مد متصل به شبکه (S)

محل خطا	PR1	PR2	BU1		BU2
F1	R1	R2	R10	R17	R4
	0.638	0.808	0.837	0.838	1.008
F2	R3	R4	R1		R6
	0.457	1.001	0.657		1.201
F3	R5	R6	R3		R8
	0.264	1.196	0.464		1.396
F4	R7	R8	R5	R18	R19
	0.069	1.393	0.269	1.210	1.593
F5	R9	R10	R2	R17	R12
	0.633	0.815	0.833	0.838	1.015
F6	R11	R12	R9	R20	R14
	0.452	1.008	0.652	0.652	1.208
F7	R13	R14	R11		R16
	0.266	1.203	0.466		1.403
F8	R15	R16	R13		R21
	0.073	1.396	0.273		1.596
Ttotal=32.539 s					

با توجه به زمان عملکرد رله‌ها در مد جزیره‌ای در جدول (۶) مشخص است زمان عملکرد رله‌ها در تابع هدف جمعا در حدود ۳۲،۵۳۹ ثانیه می‌باشد. البته باید توجه شود زمان عملکرد R17 در حالت متصل به شبکه، در تابع هدف لحاظ شده است. البته باید توجه شود زمان عملکرد R17 در حالت متصل به شبکه، در تابع هدف لحاظ شده است. بدون در نظر گرفتن زمان عملکرد رله R17، این زمان برابر ۳۰،۸۶۳ ثانیه می‌باشد. در کل رله‌ها در حدود ۴ میلی‌ثانیه سریع‌تر از حالت جزیره‌ای عمل می‌کنند. همانطور که از جداول مربوط به TMS‌ها در دو حالت کارکردی مشخص است، اندازه TMS‌ها در حالت متصل به شبکه بالاتر است. زیرا اندازه جریان‌های اتصال کوتاه بالاتر بوده و با TMS‌های بالاتر می‌توان به هماهنگی حفاظتی مورد نظر رسید. باید توجه نمود رله‌های قابل کاربرد در این طرح حفاظتی می‌بایست دارای قابلیت

^۱Dual Setting Reley

^۱Microgrid Central Controller



طرح های حفاظتی مورد بررسی قرار گیرد. و پیشنهاد می شود این مطالعه روی ریز شبکه های حلقوی صورت گیرد.

۸. مراجع

- [۱] مهدی فرزین فر، رساله دوره دکتری مهندسی برق قدرت، حفاظت ریز شبکه با کمک روش های تطبیقی و استفاده از محدودساز جریان خطا، دانشگاه سمنان، ۱۳۹۵
- [2] Najy WKA, et al. Optimal protection coordination for microgrids with gridconnected and islanded capability, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 60, Issue: 4, April 2013
- [3] Ankita Shama and B. K. Panigahi, Phase Fault Protection Scheme for Reliable Operation of Microgrids, IEEE Transactions on Industry Applications, Volume: 54, Issue: 3, May-June 2018
- [4] H. M. Shaaf, Student Member, H. H. Zeineldin, Protection Coordination for Microgrids with Grid-Connected and Islanded Capabilities using Communication Assisted Dual Setting Directional Overcurrent Relays, IEEE Transactions on Smart Grid, 2016
- [5] Ehsan Dehghanpour, et al. Optimal Coordination of Directional Overcurrent relays in Microgrids by Using Cuckoo-Linear Optimization Algorithm and Fault Current Limiter, IEEE Transactions on Smart Grid, Volume: 9, Issue: 2, March 2018
- [6] Zeineldin HH, et al. A protection coordination index for evaluating distributed generation impacts on protection for meshed distribution systems. IEEE Transactions on Smart Grid 2013;4:1523–32
- [7] Huchel L, Zeineldin HH. Planning the coordination of directional overcurrent relays for distribution systems considering DG. IEEE Transactions on Smart Grid 2015 1-1
- [8] R. Sithathan et al. Adaptive protection scheme for smart microgrid with electronically coupled distributed generations, Elsevier, Alexandria Engineering Journal, 2016
- [9] Zamani MA, et al. A protection strategy and microprocessor-based relay for low-voltage microgrids. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011;26:1873–83.