



هماهنگی حفاظتی تطبیقی در ریز شبکه‌ها در حالت عملکرد جزیره ای و متصل به شبکه

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

امروزه تامین برق پایدار برای مشترکین برق از اهمیت خاصی برخوردار بوده و شرکت های توزیع برق در تلاش هستند تا با ارائه روش های نوین تامین برق شاخص های قابلیت اطمینان برق تحویلی به مشترکین را افزایش دهند. یکی از راهکاری های افزایش قابلیت اطمینان استفاده از مولدهای تولید پراکنده می باشد، ریز شبکه ها با استفاده از انواع مولدهای تولید پراکنده و مدیریت تولید و تقاضا بوسیله مرکز کنترل ریز شبکه قابلیت کنترل فرکانس و ولتاژ را دارا بوده و در نتیجه می توانند با قابلیت کارکرد در حالت جزیره ای و متصل به شبکه اصلی، تاثیر بسزایی در بهبود شاخص های قابلیت اطمینان داشته باشند. با توجه به حضور منابع تولید پراکنده در سطح ریز شبکه و در نتیجه تغذیه دو سویه مدارها، حفاظت این شبکه ها پیچیده تر از شبکه های توزیع شعاعی بوده و 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 غیر خطی، انجام می گیرد. در این مقاله مساله هماهنگی حفاظتی تطبیقی در ریز شبکه ها مورد بحث قرار گرفته و روشی جدید جهت هماهنگی تطبیقی 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، کارکرد جزیره ای، حفاظت تطبیقی، هماهنگی حفاظتی، رله اضافه جریان



۱. مقدمه

ریزشبکه‌ها امروزه جز مسائل تحقیقاتی روز در بخش مطالعات مربوط به شبکه‌های هوشمند و شبکه‌های توزیع می‌باشند. به دلیل حضور منابع تولید پراکنده در سطح ریز شبکه مدیریت این شبکه‌ها از نظر مدیریت و کنترل، حفاظت و قابلیت اطمینان از اهمیت زیادی برخوردار بوده و امروزه مطالعات زیادی در این حوزه‌ها انجام می‌گیرد. حفاظت ریز شبکه‌ها به دلیل مشارکت منابع تجدید پذیر انرژی موجود در سطح ریز شبکه، پیچیده تر از حفاظت شبکه‌های توزیع کلاسیک، که صرفاً شبکه‌هایی شعاعی بودند، می‌باشد و می‌بایست با محاسبات و دقت نظر بیشتری صورت گیرد [۱]. ایجاد هماهنگی حفاظتی در ریز شبکه‌ها در سال‌های 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 رله‌های 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 شبکه‌های حلقوی نیز به موازات ریز شبکه‌های شعاعی مورد مطالعه قرار گرفته و در [۴-۱] 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 شبکه‌ها، مورد مطالعه قرار گرفته است. [۶-۷] اثرات منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع و شبکه‌های توزیع حلقوی را مورد مطالعه قرار داده و هماهنگی حفاظتی قابل کاربرد در این مدل شبکه‌ها را پیشنهاد و شاخص‌ها هماهنگی حفاظتی در این خصوص تدوین نموده است. در [۸] رفتار مولدهای تولید پراکنده اینورتری در بحث حفاظت ریز شبکه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. [۹] با استفاده از

رله‌های دیجیتال هماهنگی حفاظتی تطبیقی برای ریز شبکه‌ها پیشنهاد داده شده، به گونه‌ای که تیپولوژی ریز شبکه در هر حالت تشخیص داده شده و حفاظت موثری در هر تیپولوژی ریز شبکه، توسط رله‌های اضافه جریان صورت می‌گیرد. در اکثر مطالعات انجام گرفته در زمینه هماهنگی حفاظتی ریز شبکه‌ها، با تعیین مقادیر جریان تنظیمی و TMS^۲ رله‌های اضافه جریان، هماهنگی حفاظتی انجام گرفته است. در این مقاله جریان تنظیمی رله‌ها برابر جریان پخش بار گذرنده از رله‌ها در نظر گرفته شده و با تعیین مقادیر TMS رله‌ها، هماهنگی حفاظتی تطبیقی انجام می‌گیرد. در بخش‌های بعدی مدل‌سازی ریاضی مساله هماهنگی حفاظتی، شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری 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 می‌باشد. که برابر کمترین جریانی است که برابر تحریک رله می‌گردد. تابع ریاضی مذکور به صورت زیر تعریف می‌شود [۲]:

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

ثابت‌های A و B بر حسب رله مورد استفاده تغییر می‌کنند و بر اساس نوع منحنی مشخصه رله تعیین می‌گردند. در جدول (۱) مقادیر این ثابت‌ها بر حسب منحنی مشخصه آمده است. در این مقاله از نوع منحنی معمولی استفاده می‌گردد.

جدول (۱): ضرایب منحنی مشخصه

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

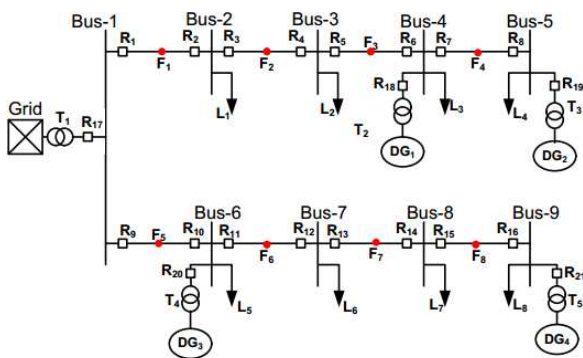
هدف از هماهنگی حفاظتی مینیمم کردن زمان هماهنگی رله هاست. طوریکه شرایط هماهنگی حفاظتی هم در شرایط اتصال به شبکه و هم در شرایط جزیره‌ای همچنان

^۱Fault Current Limiter

^۲Time Multiplier Setting

۳. شبکه مورد مطالعه

در شکل (۱) دیاگرام تک خطی شبکه ۹ باسه شعاعی می باشد. IEEE مورد مطالعه نمایش داده شده است [۳]. این شبکه از دو فیدر شعاعی تشکیل شده که توسط یک شبکه اصلی و ۴ واحد تولید پراکنده از نوع CHP^f، تغذیه می شود. در جدول (۲) نیز اطلاعات مربوط به تجهیزات این شبکه در قالب یک جدول بیان شده است. همانگونه که در شکل (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 (۱): دیاگرام تک خطی شبکه ۹ باسه شعاعی IEEE، [۳]

دیاگرام تک خطی شبکه در نرم افزار DigSilent در شکل (۲) 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 (۲) 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،

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]:

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

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. معمولا CTI در حدود ۰,۲ ثانیه فرض می شود. لذا داریم:

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

Ip و TMS معمولا توسط کارخانه سازنده رله داده می شود و مقدار Ip معمولا 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.

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

همچنین برای TMS داریم:

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

TMS مینیمم و ماکزیمم هر رله، معمولا بین ۰,۰۵ 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.

^fCombined Heat and Power

^fCoordination Time Interval



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

۴. فلوجارت پیشنهادی مساله هماهنگی بهینه

رله ها در ریزشبه

فلوجارت دستیابی به مقادیر بهینه تنظیمات رله ها در شکل (۳) نشان داده شده است. ابتدا رله های اصلی و پشتیبان در هر حالت خطا معین شده و به نرم افزار بهینه 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 که در هر حالت عملکردی بصورت جداگانه است، ادامه می یابد.

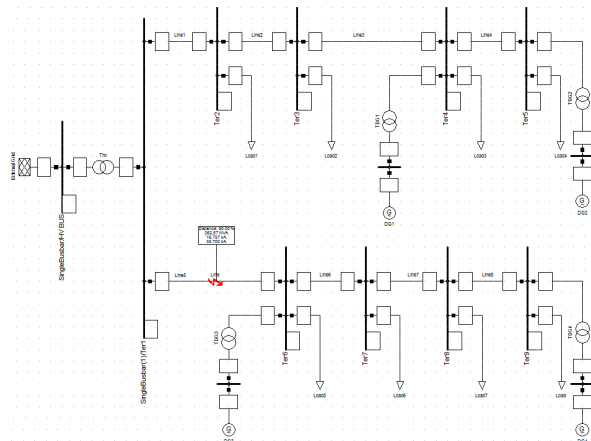
۵. نتایج شبیه سازی

۵.۱. 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 اصلی و پشتیبان، در هر حالت خطای اتصال کوتاه برقرار است و این هماهنگی حفاظتی دقیق، قابلیت اطمینان ریز شبکه را بهبود می بخشد. 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

جدول (۲): اطلاعات شبکه ۹ باسه شعاعی

مدل تجهیز	اسم تجهیز	پارامترهای تجهیز مورد نیاز				
		Short circuit power	X/R ratio	Voltage set point	Angle	چون
شبکه اصلی	For external Grid	500MVA	۶	1 Pu	۰	
خطوط انتقال	For all lines	Rated voltage	Rated current	Resistance	Reactance X	Long
		12.47 kv	0.49 Ka	0.1529 ohm/km	0.1406 ohm/km	500 m
مولدها	For all DGS	Nominal power	Nominal voltage	Power factor	Stator resistance (Xd)	
		5MVA	0.48KV	۰.۸	0.1 Pu	
ترانسفورماتور	مشخصات	Rated power	Nominal frequency	LV	HV	
		T ₁	20 MVA	50 Hz	12.47 kv	115 Kv
		T ₂ , T ₃ , ..., T ₅	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 (۲): دیاگرام تک خطی شبکه در نرم افزار DigSilent

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

شکل (۳): 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
200	R18	100	R12	100	R7	10	R2
200	R19	10	R13	100	R8	100	R3
210	R20	10	R14	10	R9	100	R4
210	R21	100	R15	10	R10	200	R5

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

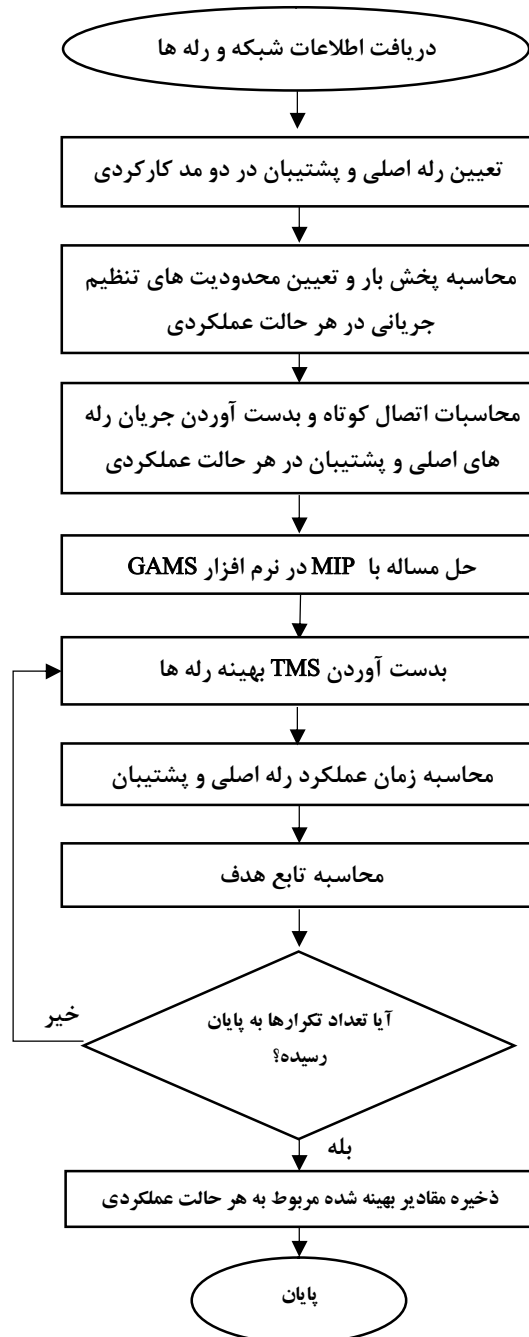
محل خطا	PR1	PR2	BU1	BU2	
F1	R1	R2	R10	R4	
	2127	2150	2127	2150	
F2	R3	R4	R1	R6	
	2080	2198	2080	2198	
F3	R5	R6	R3	R8	R18
	2058	2223	2058	1105	1118
F4	R7	R8	R5	R18	R19
	3122	1112	2024	1100	1112
F5	R9	R10	R2	R12	R20
	2103	2174	2103	1069	1105
F6	R11	R12	R9	R20	R14
	3144	1087	2046	1100	1087
F7	R13	R14	R11		R16
	3043	1099	3043		1099
F8	R15	R16	R13		R21
	2947	1112	2947		1112

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

TMS	REL	TMS	REL	TMS	REL	TMS	REL
0.518	R16	0.24	R11	0.44	R6	0.559	R1
0.363	R18	0.377	R12	0.05	R7	0.699	R2
0.41	R19	0.238	R13	0.51	R8	0.221	R3
0.472	R20	0.899	R14	0.538	R9	0.481	R4
0.404	R21	0.05	R15	0.72	R10	0.101	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 ۳۳,۵۷۹ ثانیه می باشد.

متناظر اصلی و پشتیبان، بخش وسیعی از سطح ریز شبکه ممکن است در حین خطای اتصال کوتاه، بی برق گردد.



که جریان از سمت شبکه نیز به سمت رله شارش می شود، بالاتر از سطح اتصال کوتاه در مد جزیره ای می باشد. البته این موضوع بستگی به میزان تزریق جریان از شبکه اصلی به سمت ریز شبکه در حین اتصال کوتاه دارد و ممکن است اگر جریان کمتری از شبکه اصلی به سمت ریز شبکه تزریق شود تاثیر زیادی در زمان عملکرد رله ها نداشته باشد. با توجه به زمان عملکرد رله ها در مد متصل به شبکه در جدول (۱۰)، مشخص است زمان عملکرد رله ها در تابع هدف جمعا در حدود ۳۲،۷۰۷ ثانیه می باشد.

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

In(A)	REL	In(A)	REL	In(A)	REL	In(A)	REL	
94	R16	123	R11	186	R6	97	R1	
175	R17	123	R12	93	R7	97	R2	
192	R18	35	R13	93	R8	107	R3	
190	R19	35	R14	78	R9	107	R4	
192	R20	94	R15	78	R10	186	R5	
195	R21	در مد متصل به شبکه عملکرد دارد.						

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	
	14637	2150	1993	12650	2150	
F2	R3	R4	R1		R6	
	12655	2198	12655		2198	
F3	R5	R6	R3		R8	R18
	11817	2223	11817		1105	1118
F4	R7	R8	R5	R18	R19	
	12035	1112	11008	1041	1112	
F5	R9	R10	R2	R17	R12	R20
	14614	2174	1971	12650	1069	1105
F6	R11	R12	R9	R20	R14	
	13601	1087	12569	1035	1087	
F7	R13	R14	R11		R16	
	11783	1099	11783		1099	
F8	R15	R16	R13		R21	
	10345	1112	10345		1112	

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

محل خطا	PR1	PR2	BU1		BU2	
F1	R1	R2	R10		R4	
	0.691	0.863	0.891		1.063	
F2	R3	R4	R1		R6	
	0.494	1.055	0.694		1.255	
F3	R5	R6	R3		R8	R18
	0.296	1.249	0.496		1.449	1.449
F4	R7	R8	R5	R18	R19	
	0.098	1.445	0.298	1.463	1.645	
F5	R9	R10	R2		R12	R20
	0.667	0.887	0.867		1.087	1.958
F6	R11	R12	R9	R20	R14	
	0.471	1.080	0.671	0.671	1.280	
F7	R13	R14	R11		R16	
	0.275	1.277	0.475		1.477	
F8	R15	R16	R13		R21	
	0.100	1.469	0.300		1.669	
Ttotal=33.579 s						

۵،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 اصلی و پشتیبان 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 اصلی و پشتیبان، بخش وسیعی از سطح ریز شبکه، ممکن است در حین خطای اتصال کوتاه، بی برق گردد. 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. به عبارتی سطح اتصال کوتاه در مد کارکرد متصل به شبکه، برای رله هایی

حفاظتی می بایست دارای قابلیت تنظیم دوگانه^۵ باشند، تا بتوان در دو مد کارکردی رله‌ها را تنظیم نمود. به محض ارسال سیگنال تریپ R17 به مرکز کنترل ریز شبکه^۶ 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.

۶. نتیجه‌گیری

حفاظت ریز شبکه‌ها به دلیل تغذیه دو سویه مدارها در سطح شبکه، از حفاظت کلاسیک در شبکه‌های توزیع، که بصورت شعاعی تغذیه می‌شوند، پیچیده‌تر می‌باشد. 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. 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 تغذیه شونده از ریز شبکه، از شاخص‌های قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار خواهد بود.

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

TMS	REL	TMS	REL	TMS	REL	TMS	REL
0.505	R16	0.317	R11	0.433	R6	0.48	R1
0.534	R17	0.32	R12	0.05	R7	0.368	R2
0.357	R18	0.233	R13	0.505	R8	0.327	R3
0.408	R19	0.613	R14	0.497	R9	0.444	R4
0.258	R20	0.05	R15	0.4	R10	0.163	R5
0.415	R21	R17 در مد متصل به شبکه عملکرد دارد.					

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

محل خطا	PR1	PR2	BU1		BU2	
F1	R1	R2	R10	R17	R4	
	0.637	0.806	0.837	0.837	1.006	
F2	R3	R4	R1		R6	
	0.457	0.999	0.657		1.119	
F3	R5	R6	R3		R8	R18
	0.264	1.193	0.464		1.393	1.393
F4	R7	R8	R5	R18	R19	
	0.069	1.389	0.269	1.435	1.589	
F5	R9	R10	R2	R17	R12	R20
	0.630	0.814	0.830	0.837	1.014	1.014
F6	R11	R12	R9	R20	R14	
	0.450	1.006	0.650	0.681	1.206	
F7	R13	R14	R11		R16	
	0.265	0.202	0.465		1.402	
F8	R15	R16	R13		R21	
	0.071	1.395	0.271		1.595	
Ttotal=32.707 s						

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 ۳۱،۰۳۳ ثانیه می‌باشد. در کل رله‌ها در حدود ۲،۶ میلی ثانیه 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

^۵Dual Setting Reley

^۶Microgrid Central Controller



- [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 Smrat 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.

پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی در این زمینه عدم قطعیت‌های تولید و بار در سطح ریز شبکه و همچنین رفتار منابع انرژی تجدید پذیر در حین اتصال کوتاه و تاثیر آنها در ارائه طرح‌های حفاظتی مورد بررسی قرار گیرد. همچنین اثر ورود و خروج مولدهای تولید پراکنده در هماهنگی حفاظتی لحاظ گردد. ریز شبکه مورد مطالعه در این مقاله بصورت شعاعی بوده و می‌توان در مطالعات آتی روی ریز شبکه‌های حلقوی هماهنگی حفاظتی را مورد بررسی قرار داد.

۷. تشکر و قدر دانی

در پایان از پرسنل محترم معاونت برنامه ریزی شرکت توزیع نیروی برق تهران بزرگ که همکاری صمیمانه‌ای در راستای تهیه این مقاله داشته‌اند، تشکر و قدر دانی می‌نماییم. همچنین از آقای دکتر پوریا معقولی عضو هیات علمی دانشگاه شاهد، آقای دکتر امیر امیر حسین خزعلی از پرسنل مدیریت شبکه ایران و آقای دکتر فرهاد یزدی از پرسنل دفتر مهندسی شرکت توزیع نیروی برق تهران، که در خصوص بازبینی و ارائه پیشنهادات مفید در راستای تدوین نهایی مقاله، همکاری نمودند، تشکر می‌نماییم.

۸. مراجع

- [۱] مهدی فرزین فر، رساله دوره دکتری مهندسی برق قدرت، حفاظت ریز شبکه با کمک روش‌های 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