

بازیابی هماهنگی رله های اضافه جریان جهت دار در شبکه های توزیع حاوی منابع تولید پراکنده با استفاده از محدودساز جریان خطا

دکتر مجتبی خدر زاده
عضو هیات علمی دانشگاه
صنعت آب و برق

دکتر حمید جوادی
عضو هیات علمی دانشگاه
صنعت آب و برق

سید محمد علی موسوی
دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه
صنعت آب و برق

واژه‌های کلیدی: زمان هماهنگی رله های اضافه جریان (CTI)، تولید پراکنده، محدودساز جریان خطا (FCL)

چکیده

استفاده از واحدهای تولید پراکنده در شبکه های توزیع موجب تغییر سطح اتصال کوتاه شبکه و در نتیجه تغییر جریان گذرنده از رله ها می گردد. با تغییر سطح اتصال کوتاه، عملکرد سیستم حفاظتی با مشکل مواجه می شود. در این مقاله سعی می شود با استفاده از محدودساز جریان خطا، جریان خطای تولید توسط واحدهای تولید پراکنده محدود شود. با کنترل جریان خطای تولیدی توسط واحد تولید پراکنده و محدودسازی آن، علاوه بر جلوگیری از خارج مدار کردن واحد DG، هماهنگی مجدد رله ها بدون نیاز به تنظیم مجدد آنها تامین می شود. سه نوع محدودساز جریان خطا، جهت بازیابی هماهنگی رله ها مورد استفاده قرار می گیرد و نتایج حاصل از این سه نوع محدودساز با یکدیگر مقایسه شده و تاثیر نوع محدودساز بر هماهنگی مجدد رله ها مورد

بررسی قرار می گیرد. در پایان نیز پیشنهادهایی جهت تعیین نوع و اندازه بهینه محدودسازهای مورد استفاده، ارائه می شود.

1-مقدمه

سیستم های توزیع حلقوی بمنظور اطمینان از تامین بار و افزایش قابلیت اطمینان سیستم استفاده می شوند. در چنین سیستم هایی ادوات حفاظتی مورد استفاده عموماً از نوع رله های اضافه جریان معکوس با زمان می باشند. این رله ها معمولاً برای حفاظت اولیه خطوط توزیع و حفاظت ثانویه خطوط انتقال مورد استفاده قرار می گیرند [1]. رله های اضافه جریان بمنظور افزایش قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی و حداقل سازی قطع بار در شبکه با یکدیگر هماهنگ می شوند. اضافه شدن واحدهای تولید پراکنده به سیستم توزیع باعث دگرگونی طرح های حفاظتی موجود می گردد. اضافه کردن

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

شود. سپس سعی می شود با استفاده از محدودساز جریان خطا، هماهنگی رله ها بدون نیاز به تنظیم مجدد آنها بازیابی شود. چند نوع محدودساز جریان خطا مورد استفاده قرار می گیرد و برتری هر نوع بر سایر انواع دیگر مورد بررسی قرار می گیرد.

2- هماهنگی رله های اضافه جریان جهت دار

در بحث حفاظت سیستم های قدرت، هدف از هماهنگی رله ها، تعیین و تنظیم رله های اصلی و پشتیبان است بگونه ای که در کمترین زمان ممکن نسبت به وقوع خطا عکس العمل نشان داده شود، تمام نواحی موجود در شبکه تحت حفاظت سیستم اصلی و پشتیبان باشد و در ضمن زمان هماهنگی لازم بین رله های اصلی و پشتیبان موجود در شبکه نیز رعایت گردد.

2-1- قیود رله های اصلی و پشتیبان

زمان عملکرد رله های اضافه جریان تابعی از مقدار جریان عبوری از رله و تنظیمات رله می باشد. این رابطه را می توان بصورت زیر نوشت.

$$t = TDS \left\{ \frac{A}{(M_i)^C - 1} + B \right\}, M_i = \frac{I_{fi}}{I_{Pi}} \quad (1)$$

که در این رابطه، t زمان عملکرد رله، TDS^2 تنظیم زمانی رله و I_P جریان آستانه³ یا جریان قطع رله می باشد. I_f نیز جریان خطای عبوری از رله می باشد. ضرایب A ، B و C نیز ثابت های وابسته به نوع رله و مشخصه مورد استفاده در آن می باشند.

جریان قطع هر رله دارای یک مقدار مینیمم و یک مقدار ماکزیمم می باشد که در رابطه (2) نشان داده شده است. این مقدار مینیمم و ماکزیمم معمولاً 1.2 و 2 برابر جریان نامی گذرنده از رله در حالت عادی شبکه در نظر گرفته می شود. بصورت مشابه، زمان تاخیر رله ها نیز دارای یک مقدار مینیمم

واحدهای تولید پراکنده به سیستم توزیع دارای مزیت ها و معایبی در طراحی و بهره برداری از سیستم توزیع می باشد. یکی از این معایب، تاثیر آن بر عملکرد سیستم حفاظتی می باشد. دلیل این امر این است که با نصب واحد DG در سیستم توزیع، جهت و مقدار توان در خطوط تغییر می کند. شدت این دگرگونی، به اندازه، محل نصب، نوع تکنولوژی مورد استفاده و نحوه اتصال واحد DG به شبکه بستگی دارد.

در حالتی که واحد DG در مدار حضور نداشته باشد مقالات بسیار زیادی برای حل مسئله هماهنگی رله ها ارائه شد. استفاده از برنامه ریزی خطی [3],[4] و نیز برنامه ریزی غیر خطی [5] روشهایی است که برای حل مسئله هماهنگی رله ها استفاده شده است. روشهای مبتنی بر هوش مصنوعی مانند ژنتیک [6] و الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات [7] روشهای دیگری است که بدین منظور استفاده شده است. در [2] برای محدود نمودن دامنه جستجو و افزایش سرعت اجرای الگوریتم از ترکیب برنامه ریزی خطی و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. برای سیستم های حاوی منابع تولید پراکنده، حل مسئله هماهنگی رله ها هنوز در حال تکامل می باشد. در [8] تاثیر انواع واحدهای DG بر سطح اتصال کوتاه سیستم بررسی شده است. با توجه به تاثیر واحد تولید پراکنده بر سطح جریان اتصال کوتاه، در [9] پیشنهاد شده است در صورت نصب واحد DG در شبکه، جریان آستانه رله ها مورد بازیابی قرار گیرد. بمنظور کاهش جریان خطای عبوری از رله ها در یک شبکه توزیع شعاعی، در [10] پیشنهاد استفاده از محدودساز جریان خطا¹ داده شده است. استفاده از محدودساز جریان خطا بصورت سری با واحدهای تولید پراکنده در یک شبکه توزیع حلقوی، در [12] بصورت گسترده ای مورد بررسی قرار گرفته است.

در این مقاله ابتدا هماهنگی بهینه رله های موجود در یک شبکه توزیع حلقوی بهم پیوسته، بررسی شده و پس از تنظیم رله های اضافه جریان جهت دار، به بررسی تاثیر نصب واحدهای تولید پراکنده بر عدم هماهنگی رله ها پرداخته می

² Time Delay Setting

³ Pickup Current

¹ Fault Current Limiter

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

در این رابطه $I_{f_{j,i}}$ ، جریان خطای گذرنده از رله پشتیبان j ام به ازای خطا در ناحیه حفاظت رله اصلی i ام می باشد و سایر پارامترها نیز در رابطه (1) تعریف شده است.

2-2- تابع هدف مسئله بهینه سازی

در این مقاله جهت حل مسئله بهینه سازی تنظیمات رله ها، از تابع هدف (7) استفاده شده است. با استفاده از این تابع، علاوه بر مینیمم سازی زمان عملکرد رله ها، شرط رعایت زمان هماهنگی مجاز رله ها نیز تامین می شود.

$$O.F = \alpha_1 \sum (t_i)^2 + \alpha_2 \sum (\Delta t_{mb}^{F1} - \beta_2 (\Delta t_{mb}^{F1} - |\Delta t_{mb}^{F1}|))^2 \quad (7)$$

$$+ \alpha_3 \sum (\Delta t_{mb}^{F2} - \beta_3 (\Delta t_{mb}^{F2} - |\Delta t_{mb}^{F2}|))^2$$

$$\Delta t_{mb} = t_b - t_m - CTI$$

که در این رابطه:

t_i : زمان عملکرد رله i ام به ازای خطای نزدیک به رله i ام.
 t_b, t_m : به ترتیب زمان عملکرد جفت رله های اصلی و پشتیبان به ازای خطای نزدیک به رله اصلی i ام.
 CTI: زمان هماهنگی بین رله ها که معمولاً بین مقدار 0.3 تا 0.4 در نظر گرفته می شود.

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$: پارامترهای کنترل کننده یا ضرایب وزنی، جهت ارزش دادن به هر یک از ترم های مورد نظر در تابع هدف می باشد.

β_2, β_3 : پارامترهایی که جهت تداخل عملکرد رله ها در نظر گرفته می شود.

در این مقاله، برای حل مساله بهینه سازی، مقدار ضرایب $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ به ترتیب برابر 100، 100 و 0.1 در نظر گرفته می شوند. ضرایب β_2, β_3 نیز هر دو برابر 100 در نظر گرفته می شوند.

2-3- الگوریتم بهینه سازی تنظیم رله ها

در این مقاله جهت حل مسئله هماهنگی بهینه رله ها، عملیات بهینه سازی در دو فاز صورت می گیرد. ابتدا در فاز 1، مقادیر I_p و TDS بعنوان کمیت هایی پیوسته و مجهول در نظر

و یک مقدار ماکزیمم می باشد که بر اساس مشخصه زمان-جریان رله تعیین می گردد (رابطه (3)). هر دو سری از محدودیت ها برای هر فاز بهینه سازی لحاظ می شوند.

$$I_{Pi \min} \leq I_{Pi} \leq I_{Pi \max} \quad (2)$$

$$TDS_{i \min} \leq TDS_i \leq TDS_{i \max} \quad (3)$$

رله های موجود در سیستم، ممکن است به دلایل مختلفی عمل نکنند. به این دلیل، معمول است که حفاظت اولیه با سیستم های حفاظتی دیگر حمایت شود تا عمل حفاظت سیستم اصلی کامل شده و امکان اشتباه در برطرف کردن خطا از سیستم، مینیمم گردد.

زمان عملکرد رله های پشتیبان، بایستی بزرگتر از زمان عملکرد رله های اصلی به ازای همان محل خطا باشد که برای این کار از زمان هماهنگی رله ها¹ (CTI) استفاده می شود. مقدار CTI بر اساس تجربیات مهندسی شرکت های توزیع تعیین می گردد که شامل زمان مرده در رله ها، زمان عملکرد بریکر و نیز حاشیه امنیت لحاظ شده برای خطای رله می باشد [12]. این مقدار برای رله های الکترومکانیکی معمولاً بین 0.3 تا 0.4 لحاظ می شود [7].

$$t_{j,i} - t_i \geq CTI_{j,i} \dots \forall i, j \in N \quad (4)$$

در این رابطه t_i ، زمان عملکرد رله اصلی i ام به ازای خطا در ناحیه حفاظتی آن رله، و $t_{j,i}$ زمان عملکرد رله پشتیبان j ام، به ازای خطا در ناحیه حفاظتی رله اصلی i ام می باشد که با استفاده از رابطه (5) بدست آورده می شود.

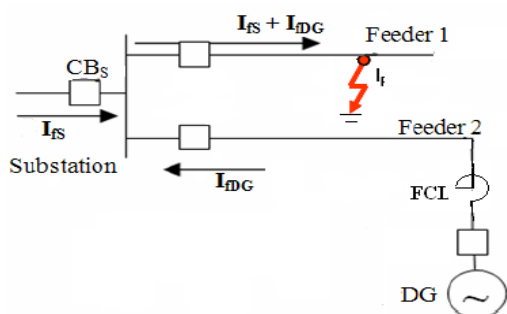
$$t_{j,i} = TDS \left\{ \frac{A}{(M_{j,i})^c - 1} + B \right\} \quad (5)$$

$$M_{j,i} = \frac{I_{f_{j,i}}}{I_{Pj}}$$

¹ Coordination Time Interva

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

کردن محدودساز جریان خطا با واحد تولید پراکنده، می توان جریان خطای تولیدی توسط آن واحد را کنترل کرده و بدین ترتیب با محدودسازی جریان خطا، هماهنگی رله های موجود در سیستم را بازیابی نمود.



شکل 1: تاثیر واحد DG بر حفاظت اضافه جریان

4- شبیه سازی

4-1- شبکه مورد مطالعه

شبکه توزیع مورد مطالعه، شبکه استاندارد IEEE 30-bus می باشد. سیستم به همراه همه جزئیات آن در نرم افزار DigSilent پیاده سازی شده است (کندانسورهای سنکرون و محدودیت های آنها، نسبت تبدیل واقعی ترانسهای توزیع و ..). شبکه توزیع مورد مطالعه که در شکل (2) نشان داده شده است از سه پست توزیع اولیه (132/33kV) که در شین های 10، 12 و 27 قرار دارند تغذیه می گردد. هر کدام از فیدرهای توزیع توسط 2 رله اضافه جریان جهت دار حفاظت می شوند که یکی از آنها در ابتدای فیدر و دیگری در انتهای آن نصب می گردند. تمام فیدرهایی که نیاز به حفاظت داشته باشند، حفاظت شده اند. همانگونه که در شکل (2) نیز نشان داده شده است در این سیستم تعداد 39 رله اضافه جریان مورد استفاده قرار گرفته است. فرض شده است که همه رله ها مشابه باشند و همگی از منحنی استاندارد IEC 255-3 استفاده کنند. این مشخصه از رابطه (1) پیروی می کند. مقادیر ثوابت A، B و C به ترتیب 0.14، 0 و 0.02 می باشند.

11 محل کاندید برای نصب واحدهای تولید پراکنده انتخاب می گردد. این محل ها عبارتند از: شین های 10، 12 و 27 که شین های پست می باشند و نیز شین های 15 تا 19 و 21

گرفته می شوند. عملیات شبیه سازی صورت می گیرد. جریان خطای گذرنده از رله اصلی و پشتیبان به ازای خطا های نزدیک به رله اصلی و نیز خطاهای نزدیک به انتهای ناحیه حفاظتی رله اصلی، به ازای همه زوج رله های اصلی و پشتیبان اندازه گیری می شود. با مشخص بودن جریان رله ها، و نیز مشخصه مورد استفاده در رله ها، عملیات بهینه سازی تنظیم رله ها صورت می گیرد. برای این منظور یک برنامه بهینه سازی در نرم افزار MATLAB نوشته شده است. فرآیند بهینه سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک صورت می گیرد. با اعمال الگوریتم مذکور به مسئله بهینه سازی، مقادیر I_p و TDS همه رله ها بدست آورده می شود. سپس در فاز 2 فرآیند بهینه سازی، جریان تنظیمی رله ها (I_p ها) با توجه به مقادیر تنظیمی رله ها گرد می شوند. عملیات بهینه سازی دوباره با فرض مشخص بودن جریان تنظیمی رله ها، جهت یافتن مقادیر زمانی تنظیم رله ها (TDS ها) صورت می گیرد.

3- تاثیر حضور منابع تولید پراکنده بر حفاظت اضافه جریان

با نصب واحد DG، یک امپدانس با قسمتی از شبکه بصورت موازی قرار می گیرد. در نتیجه امپدانس دیده شده از محل خطا کوچک شده و سطح جریان خطا افزایش می یابد. افزایش ظرفیت واحد DG را می توان معادل کوچک شدن امپدانس واحد DG دانست. با افزایش ظرفیت واحد DG، امپدانس معادل واحد DG نیز کوچک شده و در نتیجه سطح اتصال کوتاه شبکه تغییر می کند [13]. از آنجا که تنظیمات رله های اضافه جریان موجود در شبکه بر حسب جریان اتصال کوتاه دیده شده توسط رله ها صورت می گیرد بنابراین تغییر سطح اتصال کوتاه شبکه باعث تغییر زمان عملکرد رله ها و در نتیجه به هم خوردن زمان هماهنگی رله ها می گردد. همانگونه که در شکل (1) نشان داده شده است، با نصب واحد DG بر روی فیدر 2 جریان خطای گذرنده از رله A برابر $I_{fs} + I_{fDG}$ می شود در صورتیکه قبل از نصب واحد DG این مقدار جریان خطا برابر I_{fs} بوده است. با سری

بیست و چهارمین کنفرانس بین المللی برق

4-2- عدم هماهنگی رله ها در حضور واحدهای تولید

پراکنده

در این قسمت ابتدا فرض می شود که هر کدام از واحدهای تولید پراکنده بصورت جداگانه در مدار باشند. با نصب هر واحد تولید پراکنده در محل های کاندید، جریان خطا و جریان بار تغییر می کند. در جدول (I) به ازای نصب واحد تولید پراکنده بر روی پست های کاندید، جریان تولیدی توسط واحد DG در حالت کار عادی شبکه و نیز جریان خطای تولیدی واحد DG به ازای خطا بر روی چند شین مختلف نشان داده شده است. مقدار جریان خطای تولیدی توسط واحد DG بستگی به محل خطا دارد. بیشترین مقدار ممکن جریان خطا زمانی پیش می آید که خطا بر روی شین محل نصب واحد DG اتفاق بیفتد. بعنوان مثال در حالتی که واحد DG بر روی شین 12 نصب شده باشد، کمترین مقدار جریان خطای تولیدی توسط واحد DG زمانی بوجود می آید که خطا بر روی شین 30 اتفاق بیفتد، یعنی در فاصله نسبتاً دور از محل نصب واحد DG. در این حالت مقدار جریان خطا 98.3% جریان نامی واحد DG (860 A) می باشد. و بیشترین مقدار جریان خطا نیز برابر 483.9% جریان نامی واحد DG می باشد که به ازای خطا بر روی شین 12 بدست می آید.

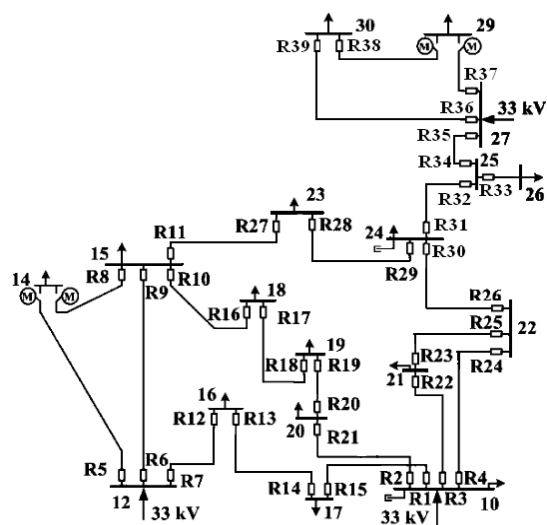
جدول 1: ماکزیمم جریان بار و جریان خطای تولیدی توسط چند واحد DG

به ازای چند محل خطای نمونه

DG Location	I Load (A)	I Fault (A)		
		Faulted Bus		
		Bus12	Bus19	Bus30
Bus12	860	4162.2	1283.8	845.4
Bus17	821	2331.8	1597.3	852.6
Bus19	791.6	2658	4352.5	876.5
Bus24	787.7	2370	1681.1	1069.4
Bus27	787.3	1611.4	1218.6	2036.6
Bus30	794.1	1547	1212.4	4491

در اینجا نتایج شبیه سازی برای رله های عددی ارائه می شود. در رله های عددی مقدار CTI در حضور واحدهای DG برابر 0.27s در نظر گرفته می شود که حدود 10% از مقدار اصلی آن تفاوت دارد (0.3s).

، 24 و 30 که شین های بار می باشند. مکان های کاندید برای نصب واحدهای تولید پراکنده (CDGL) بر مبنای شرایط محیطی و محدودیت های سوختی انتخاب شده اند [12]. تکنولوژی انتخابی واحدهای DG از نوع ژنراتور سنکرون بوده و ظرفیت نامی آنها 10MVA می باشد و در ضریب توان 0.9 پسفاز کار می کنند. مقدار راکتانس گذرای ماشین برابر 0.15 pu و بر اساس توان نامی ماشین می باشد. هر کدام از واحدها توسط یک ترانسفورماتور افزایشده (6.6kV/33kV) با ظرفیت 10MVA و راکتانس 5% به شبکه متصل می شوند. واحدهای DG بر اساس توان آنها و نیز محدودیت ماکزیمم و مینیمم توان راکتیو که در حالت کار عادی شبکه می توانند تولید کنند شبیه سازی می شوند. ماکزیمم توان تولیدی هر واحد تولید پراکنده، بر حسب درصدی از کل توان بارهایی که در شبکه 33kV بایستی تغذیه شوند و نیز اطلاعات آرشیوی و تجربیات شرکت های توزیع در نظر گرفته می شود [12]. در این مطالعه، ماکزیمم توان هر واحد تولید پراکنده در حدود 10% ماکزیمم بارگذاری شبکه توزیع در نظر گرفته می شود (115MW و در ضریب توان 0.9 پسفاز). این محدودیت ظرفیت تولیدی واحدهای تولید پراکنده برای در نظر گرفتن مفهوم تولید پراکنده لحاظ شده است.



شکل 2: قسمت 33kV شبکه IEEE 30 bus

بیست و چهارمین کنفرانس بین المللی برق

جدول 2: تعداد جفت رله های ناهماهنگ در صورت نصب

واحد DG بر روی پست های کاندید

DG Location	Number of Miscoordinated Relays
Bus10	0
Bus12	0
Bus15	5
Bus16	3
Bus17	3
Bus18	6
Bus19	5
Bus21	7
Bus24	7
Bus27	5
Bus30	4

3-4- هماهنگی رله ها در حضور واحد تولید پراکنده و

محدودساز جریان خطا

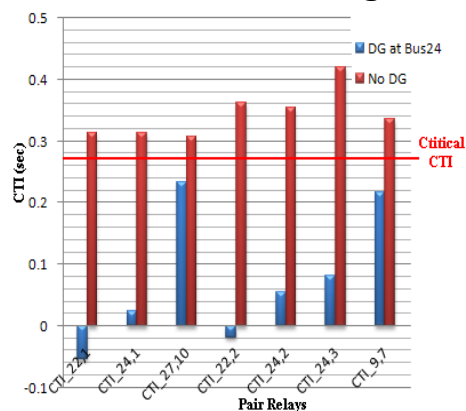
با استفاده از محدودساز جریان خطا، جریان خطای تولیدی توسط واحد DG محدود می شود. با کاهش جریان خطا، رله های اصلی و پشتیبان موجود در شبکه هماهنگی خود را باز می یابند. در این قسمت، ابتدا هر کدام از واحدهای DG بصورت جداگانه وارد مدار می شوند و سپس ترکیبی از واحدهای DG که بصورت همزمان در مدار باشند مورد بحث قرار خواهد گرفت. محدودسازهای جریان خطا از نوع راکتانسی و مقاومتی و ترکیبی از این دو، مورد استفاده قرار خواهند گرفت و نتایج حاصل از بکارگیری هر نوع با یکدیگر مقایسه خواهد شد. نحوه قرار گرفتن محدودساز جریان خطا در کنار واحد تولید پراکنده در شکل (1) نشان داده شده است.

3-4-1- استفاده از محدودساز جریان خطای راکتانسی

در صورتیکه یک محدودساز جریان خطای راکتانسی با واحد DG سری شود، جریان خطای تولیدی توسط واحد DG کاهش پیدا می کند. این مقدار کاهش بستگی به اندازه ی امپدانس سری شده با واحد DG دارد. فرض شود واحد DG بر روی شین 24 نصب شده باشد، در آن صورت همانگونه که در شکل (3) نشان داده شده بود، هماهنگی 7 جفت رله

با این فرض با نصب واحد DG بر روی شین 24، هماهنگی بین 7 جفت رله اصلی و پشتیبان بهم می خورد. شکل (3) مقدار CTI رله هایی که دچار مشکل شده اند را در حالت حضور و عدم حضور واحد DG بر روی شین 24، نشان می دهد. همانگونه که در این شکل دیده می شود، نصب واحد DG باعث شده است که به ازای خطا در ناحیه حفاظتی رله اصلی، رله پشتیبان نه تنها زمان هماهنگی مجاز را رعایت نکرده بلکه در برخی از موارد حتی زودتر از رله اصلی نیز عمل کرده است (مقدار منفی CTI). مقدار جدید CTI، (0.27s) بر اساس 90% مقدار اصلی آن یعنی 0.3s انتخاب شده است که این مقدار بر اساس محدودیت های الکتریکی و اقتصادی لحاظ شده است.

با نصب واحد DG بر روی هر پست کاندید و به ازای گذاشتن خطا در تمامی قسمت های شبکه، تعداد جفت رله هایی که با مشکل رعایت مقدار مجاز زمان هماهنگی روبرو می شوند، مشخص می شوند. برای این منظور یک برنامه جامع توسط زبان برنامه نویسی DigSilent¹ که به DPL معروف است نوشته شده است. با اجرای این برنامه تعداد جفت رله های ناهماهنگ بدست می آید. این مقادیر در جدول (2) و به ازای نصب واحد DG بر روی تمامی مکان های کاندید نشان داده شده است. در قسمت بعد سعی می شود با استفاده از محدود ساز جریان خطا، این تداخل عملکرد را تصحیح نمود.

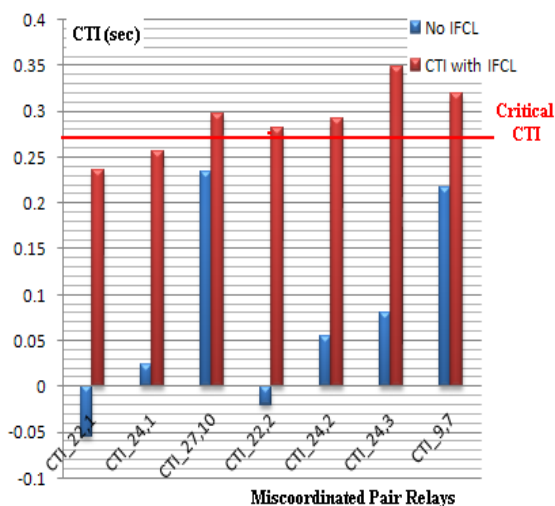


شکل 3: CTI جفت رله های اصلی و پشتیبانی که با نصب

واحد DG بر روی شین 24 دچار مشکل شده اند

¹ DigSilent Programming Language

بیست و چهارمین کنفرانس بین المللی برق

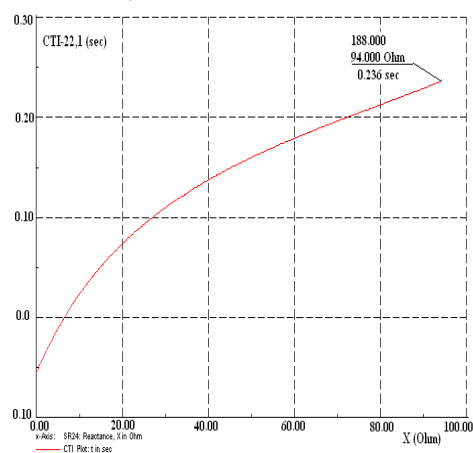


شکل 5: بهبود CTI جفت رله های اصلی و پشتیبان با استفاده از محدودساز راکتانسی به ازای نصب واحد DG بر روی شین 24

4-3-2- استفاده از محدودساز جریان خطای مقاومتی

نوع دیگر محدودساز که در اینجا استفاده می شود، محدودساز جریان خطای مقاومتی (Z-RFCL) می باشد. در صورت استفاده از این محدودساز نیز با مشکلی نظیر آنچه که در استفاده از نوع راکتانسی با آن روبرو شدیم، برخورد می کنیم. برای مقایسه بهتر این دو نوع محدودساز، دوباره فرض می شود واحد DG بر روی شین 24 نصب شده است و ضمناً تاثیر این نوع محدودساز بر مقدار CTI-22,1 بررسی می گردد چراکه در بین جفت رله هایی که دچار مشکل شده بودند، بدترین حالت محسوب می شد. با افزایش مقدار مقاومت محدودساز، مقدار CTI جفت رله اصلی 1 و پشتیبان 22 بهبود پیدا می کند و این بهبود تا رسیدن مقدار مقاومت به یک حد خاص (R=71.5 ohm) ادامه پیدا می کند. پس از آن با افزایش مقاومت، پخش بار همگرا نمی شود. به ازای این مقدار ماکزیمم مقاومت، مقدار CTI-22,1 برابر 0.239s می گردد که از حد مجاز آن کمتر می باشد. CTI سایر جفت رله هایی که با نصب واحد DG بر روی شین 24 دچار مشکل شده بودند در شکل (6) نشان داده شده است، همانگونه که در این شکل مشخص شده است، 2 جفت رله از مجموع 7 جفت رله مذکور، نتوانسته اند زمان هماهنگی مجاز خود را باز یابند.

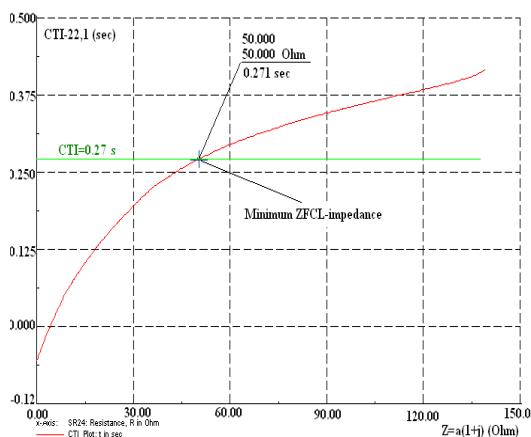
اصلی و پشتیبان دچار مشکل می شود. در این حالت CTI-22,1 بدترین مقدار ممکن را بخود می گیرد، بگونه ای که رله پشتیبان 22 زودتر از رله اصلی 1 عمل می کند. در صورتیکه یک محدودساز جریان خطای راکتانسی (Z-IFCL) با واحد تولید پراکنده سری شود با توجه به مقدار امپدانس محدودساز جریان خطا، زمان هماهنگی رله ها نیز بهبود پیدا می کند. شکل (4) تغییرات CTI دو رله اصلی 1 و پشتیبان 22 برحسب افزایش راکتانس محدودساز سری شده با واحد DG را نشان می دهد. افزایش راکتانس محدودساز جریان خطا، باعث بهبود CTI-22,1 شده است، اما در صورتیکه مقدار راکتانس سری شده، از یک حد مشخص بیشتر شود پخش بار همگرا نمی شود. ماکزیمم راکتانس مجاز استفاده شده در محدودساز برابر $X=94$ (ohm) می باشد که به ازای آن، مقدار CTI-22,1 برابر 0.236s می شود. یعنی استفاده از محدودساز راکتانسی نمی تواند زمان هماهنگی جفت رله اصلی 1 و پشتیبان 22 را به حد مجاز آن (0.27s) برساند. میزان بهبود CTI سایر جفت رله هایی که با نصب واحد DG بر روی شین 24 دچار مشکل شده بودند، به ازای استفاده از ماکزیمم راکتانس مجاز (94 ohm)، در شکل (5) نشان داده شده است. در این حالت دو جفت رله نتوانسته اند زمان هماهنگی مجاز خود را باز یابند. بصورت مشابه در حالت نصب واحد DG بر روی برخی دیگر از پست های کاندید نیز با چنین مشکلی روبرو می شویم.



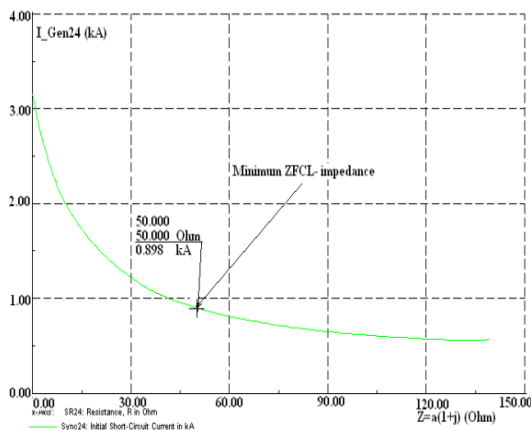
شکل 4: تغییرات CTI-22,1 با افزایش راکتانس محدودساز جریان خطای

سری شده با واحد DG نصب شده در شین 24

بیست و چهارمین کنفرانس بین المللی برق

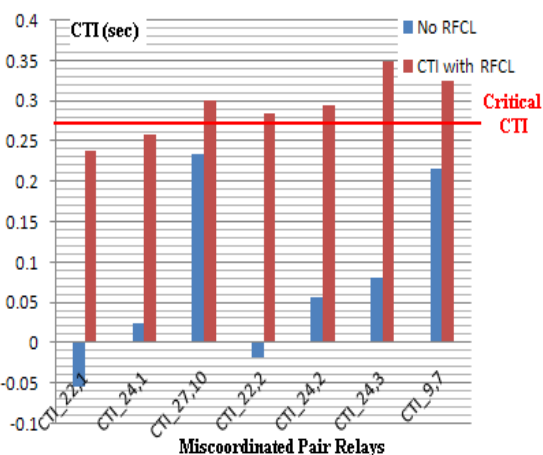


شکل 8: تغییرات CTI-22,1 با افزایش امپدانس محدودساز جریان خطای سری شده با واحد DG نصب شده در شین 24



شکل 9: کاهش جریان خطای مربوط به واحد DG نصب شده بر روی شین 24 با افزایش امپدانس محدودساز جریان خطای سری شده با آن

بمنظور رعایت مسائل اقتصادی، بایستی کمترین مقدار ممکن امپدانس در محدودساز جریان خطا استفاده گردد، بگونه ای که مقدار CTI به 0.27s برسد. با توجه به شکل (8) مشخص است که این مقدار برابر $Z=50(1+j)$ می باشد. به ازای این مقدار امپدانس، زمان هماهنگی رله 1 و 22 (CTI-22,1) برابر 0.271s شده است. به ازای این مقدار امپدانس، CTI سایر جفت رله ها نیز بهبود چشمگیری پیدا می کند که در شکل (10) این بهبود نشان داده شده است. مقدار جریان خطای واحد DG نیز در این حالت برابر 898A می باشد که در شکل (9) مشخص شده است.



شکل 7: بهبود CTI جفت رله های اصلی و پشتیبان با استفاده از محدودساز راکتانسی به ازای نصب واحد DG بر روی شین 24

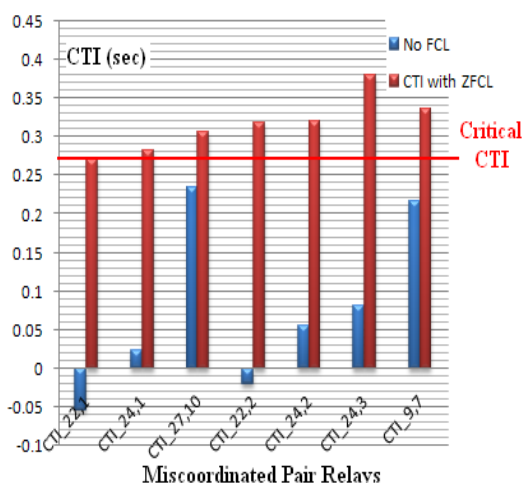
3-3-3- استفاده از محدودساز جریان خطای ترکیبی (مقاومتی و راکتانسی)

در قسمت های قبل نشان داده شد که در صورت استفاده از محدودسازهای راکتانسی و یا مقاومتی خالص، CTI مربوط به جفت رله هایی که دچار مشکل شده بودند مقدار بسیار مناسبی بهبود پیدا کرد اما در نهایت، برخی از جفت رله ها نتوانستند زمان هماهنگی خود را به مقدار مجاز برسانند. در این قسمت سعی می شود با استفاده از محدودساز امپدانس (ترکیب مقاومتی و راکتانسی)، این مشکل رفع گردد. فرض می شود بتوان امپدانس محدودساز جریان خطا را بصورت $Z=a(1+j)$ بیان نمود. در آن صورت می توان با تغییر مقدار a ، مقاومت و راکتانس سری شده با واحد تولید پراکنده را تغییر داد. همانگونه که در شکل (8) نشان داده شده است با افزایش امپدانس محدودساز جریان خطا، مقدار CTI-22,1 توانسته است به حد مجاز خود برسد. با افزایش بیشتر مقدار امپدانس محدودساز، CTI-22,1 از مقدار مرزی مجاز خود نیز فراتر رفته است بگونه ای که افزایش امپدانس توانسته است بدون اینکه پخش بار با مشکلی مواجه شود تا $Z=139(1+j)$ ادامه پیدا کند و مقدار CTI-22,1 نیز تا مقدار 0.415s افزایش پیدا کرده است. در شکل (9)، مقدار کاهش جریان خطای واحد DG نصب شده بر روی شین 24 بر حسب افزایش مقدار امپدانس محدودساز سری شده با آن نشان داده شده است.

بیست و چهارمین کنفرانس بین المللی برق

4-4- حضور همزمان چند واحد DG در مدار

الگوریتم پیشنهادی ارائه شده در قسمت قبل، می تواند برای حالتی که چند واحد DG بصورت همزمان در مدار باشند نیز اجرا شود. فرض شود که دو واحد DG هر کدام با ظرفیت نامی 10MVA بر روی دو شین مختلف نصب شده باشند، در آن صورت مقدار امپدانس محدودساز جریان خطا بگونه ای انتخاب می شود که در حالتی که یکی از واحدها به هر علتی از مدار خارج شود، واحد باقی مانده بتواند با استفاده از محدودساز خود، به تنهایی هماهنگی کل رله های موجود در شبکه را به حد مجاز برساند. در این حالت تنها به بررسی محدودساز جریان خطای امپدانس پرداخته می شود. همانگونه که در جدول (4) نشان داده شده است برای حالتی که دو واحد بر روی شینهای 12 و 24 نصب شده باشند، مقدار مینیمم امپدانس مورد نیاز برای بازیابی هماهنگی همه رله ها برای حالتی که هر کدام از واحدها به تنهایی در مدار باشند به ترتیب برابر $Z=0$ و $Z=50(1+j)$ اهم می باشد اما در صورتیکه هر دو در مدار باشند، می توان با استفاده از یک محدودساز با امپدانس $Z=47(1+j)$ اهم در جلوی هر کدام از واحدها، هماهنگی همه رله های موجود در سیستم را تنظیم نمود. از آنجا که مقدار امپدانس بایستی بگونه ای تنظیم شود که در صورت قطع هر واحد، محدودساز سری شده با واحد دیگر بتواند هماهنگی رله های موجود در سیستم را تنظیم نماید، مقدار امپدانس محدودساز برابر با بزرگترین مقدار امپدانس محدودساز در حالت عملکرد بصورت تنهایی و نیز حالت عملکرد مشترک در نظر گرفته می شود. با توجه به اینکه واحد نصب شده بر روی شین 24 برای عملکرد در حالت تکی نیاز به محدودسازی با مقدار امپدانس $Z=50(1+j)$ می باشد. این مقدار برابر مینیمم امپدانس مورد نیاز محدودساز سری شده با آن واحد در نظر گرفته می شود. با مشخص شدن امپدانس محدودساز سری شده با واحد DG نصب شده بر روی شین 24، مقدار مینیمم امپدانس سری شده با واحد دیگر نیز بدست می آید. این مقدار برابر $Z=29(1+j)$ اهم می باشد که از مقدار مورد نیاز برای حالت عملکرد تکی آن واحد



شکل 10: مقدار CTI جفت رله های ناهماهنگ به ازای استفاده از محدودساز امپدانس با کمترین مقدار امپدانس ($Z=50(1+j)$)

بصورت مشابه می توان به ازای نصب واحد DG در سایر پست های کاندید، مراحل فوق را تکرار کرد. با انجام این کار مقدار کمینه امپدانس محدودساز سری شده با واحد DG، که به ازای آن همه رله ها هماهنگی مجاز خود را باز می یابند برای نصب واحد DG در هر پست کاندید بدست می آید که در ستون چهارم جدول (3) نشان داده شده است. ستون های خالی جدول بدین معنی می باشد که به ازای نصب واحد DG بر روی پست مورد نظر نمی توان از آن نوع محدودساز، استفاده نمود.

جدول 3: مقایسه امپدانس مورد نیاز انواع محدودساز جریان خطا به ازای نصب واحد DG در همه پست های کاندید

DG Location	R_min (ohm)	X_min (ohm)	Z_min= a(1+j) (ohm)
Bus10	0	0	0
Bus12	0	0	0
Bus15	---	96.5	42
Bus16	47.5	64.5	30
Bus17	59.5	77	36
Bus18	69	94.5	36.5
Bus19	---	---	49
Bus21	---	---	76.5
Bus24	---	---	50
Bus27	26.5	42	14
Bus30	24	42	14.5

بیست و چهارمین کنفرانس بین المللی برق

5- نتیجه گیری

در این مقاله با بکارگیری محدودساز جریان خطا، مشکل هماهنگی رله های اضافه جریان موجود در شبکه که با نصب واحد تولید پراکنده ایجاد شده بود بدون نیاز به تنظیم مجدد رله ها برطرف گردید. با استفاده از این روش، نیاز به خروج اضطراری واحدها که به هنگام وقوع خطا در شبکه امری ضروری به نظر می رسد رفع گردید. در نتیجه مشکل عدم سنکرون بودن واحد تولید پراکنده با شبکه که بدلیل قطع اتصال آن واحد از شبکه به هنگام وقوع خطا بوجود می آید، برطرف شد. سه نوع محدودساز مورد استفاده قرار گرفت و نشان داده شد که بایستی نوع محدودساز با توجه به محل نصب واحدهای تولید پراکنده، تعداد واحدها و اندازه آنها انتخاب گردد. در ضمن انتخاب اندازه محدودسازها بگونه ای صورت گرفت که علاوه بر رعایت مسائل اقتصادی، قابلیت اطمینان مناسبی در شبکه ایجاد گردد.

6- مراجع

- [1] صابری نوقابی، عباس و ساده، جواد و رجبی مشهدی، حبیب. 1385، "الگوریتمی جدید جهت هماهنگی رله های اضافه جریان در صورت تغییر ساختار شبکه"، بیست و دومین کنفرانس بین المللی برق (PSC)، 98-F-CAP-939
- [2] صابری نوقابی، عباس و ساده، جواد و رجبی مشهدی، حبیب. 1385، "هماهنگی رله های اضافه جریان در شبکه ای با ساختارهای متفاوت به کمک یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی"، بیست و یکمین کنفرانس بین المللی برق (PSC)، 98-F-CAP-704 ص ص 252-261

[3] Alberto J.Urdaneta, Harold Restrepo, Saul Marquez, "Coordination Of Directional OverCurrent Relay Timinng Using Linear Programming", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.11,No.1,January 1996.

[4] Bijoy Chattopadhyay, M.S.Sachdev, T.S.Sidhu, "An On-Line Coordination Algorithm For Adaptive Protwction Using Linear Programming Technique", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.11,No.1,January 1996.

بزرگتر می باشد. در این حالت مقدار بحرانی ترین CTI برابر 0.2700s می باشد که یک مقدار بسیار مناسب می باشد. بصورت مشابه می توان برای حالت های دیگر عملکرد، کمترین مقدار امپدانس مورد نیاز برای واحدها را بدست آورد که در جدول (4) برای دو حالت دیگر، این مقدار بدست آورده شده است.

جدول 4: حضور همزمان دو واحد DG در مدار

DG Operation	FCL near DG	Z=a(1+j) (Ohm)	Critical CTI (sec)
Bus12&24	FCL_12	29	0.2700
	FCL_24	50	
Bus12&27	FCL_12	17	0.2713
	FCL_27	17	
Bus21&27	FCL_21	76.5	0.2700
	FCL_27	37.5	

در صورتیکه سه واحد DG بصورت همزمان در مدار باشند نیز با استدلالی مشابه حالت دو واحدی می توان کمترین مقدار مشترک امپدانس محدودسازها را بدست آورد. بعنوان مثال در صورتیکه سه واحد DG هر کدام با ظرفیت 10MVA بر روی شین های 12، 27 و 30 نصب شده باشند، کمترین مقدار امپدانس برای بازیابی هماهنگی همه رله های موجود در سیستم برابر $Z=23(1+j)$ می باشد. چون این مقدار امپدانس، از امپدانس محدودساز مورد نیاز در حالت عملکرد تکی و یا دوگانه هر ترکیب از این سه واحد بزرگتر می باشد، بنابراین بعنوان کمترین مقدار امپدانس مورد نیاز محدودسازها انتخاب می شود. در جدول (5)، نتایج مربوط به دو حالت دیگر نیز نشان داده شده است.

جدول 5: حضور همزمان 3 واحد DG در مدار

DG Operation	FCL near DG	Z=a(1+j) (ohm)	Critical CTI (sec)
Bus12&24&27	FCL_12	47	0.2872
	FCL_24	50	
	FCL_27	44.5	
Bus12&21&27	FCL_12	67.5	0.3059
	FCL_21	76.5	
	FCL_27	67.5	
Bus12&27&30	FCL_12	23	0.2707
	FCL_27	23	
	FCL_30	23	

بیست و چهارمین کنفرانس بین المللی برق

[5] Dinesh Birla, Rudra Prakash Maheshwari, and H. O. Gupta, " **A New Nonlinear Directional Overcurrent Relay Coordination Technique, and Banes and Boons of Near-End Faults Based Approach** ", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 21, NO. 3, JULY 2006

[6] Cheng-Hung Lee and Chao-Rong Chen, " **Using Genetic Algorithm for Overcurrent Relay Coordination in Industrial Power System**", 14th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, ISAP 2007.

[7] Mohamed M. Mansour, Said F. Mekhamer, and Nehad El-Sherif El-Kharbawe, " **A Modified Particle Swarm Optimizer for the Coordination of Directional Overcurrent Relays**", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 22, NO. 3, JULY 2007

[8] Gerald T. Heydt, Anjan Bose, " **Consequences of Fault Currents Contributed by Distributed Generation** ", Power Systems Engineering Research Center, PSERC Publication 06-21, June 2006

[9] Ismail Mohamed Elmarkabi , " **CONTROL AND PROTECTION OF DISTRIBUTION NETWORKS WITH DISTRIBUTED GENERATORS**", A dissertation submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University, 2004.

[10] G. Tang, *and*. M. R. Iravani, **Application of a Fault Current Limiter To Minimize Distributed Generation Impact on Coordinated Relay Protection**", International Conference on Power Systems Transients (IPST'05) in Montreal, Canada on June 19-23, 2005.
Paper No. IPST05 – 158

[11] Javad Sadeh, " **OPTIMAL COORDINATION OF OVERCURRENT RELAYS IN AN INTERCONNECTED POWER SYSTEM**" , 15th PSCC, Liege, 22-26 August 2005.

[12] Walid El-Khattam, Tarlochan S. Sidhu, "Restoration of Directional Overcurrent Relay Coordination in Distributed Generation Systems Utilizing Fault Current Limiter", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 23, NO. 2, APRIL 2008.

[13] Nguyen Hoang Viet, MA. Dang Tuan Khanh, " **IMPACT OF THE DISTRIBUTED GENERATION ON THE PROTECTION OF DISTRIBUTION NETWORKS AND STUDYING WIND GENERATOR**" , International Symposium on Electrical & Electronics Engineering 2007 - Oct 24, 25 2007 HCM City, Vietnam
