

هماهنگی بهینه رله‌های اضافه‌جریان با در نظر گرفتن جریان‌های گذرای ژنراتورها

مهدی قطبی ملکی^۱، دانشجوی دکتری؛ رضا محمدی^۲، استادیار؛ حمید جوادی^۳، استادیار

- ۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران - آدرس پست الکترونیکی: m_ghotbi@sbu.ac.ir
 ۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران - آدرس پست الکترونیکی: re_mohammadi@sbu.ac.ir
 ۳- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران - آدرس پست الکترونیکی: javadi@pwut.ac.ir

چکیده: جریان اتصال کوتاه در هر شبکه‌ای شامل جریان‌های حالت ماندگار و حالت گذرا است. در روش متعارف هماهنگی رله‌ها، از مولفه گذرای جریان صرف نظر می‌شود و رله‌ها براساس جریان‌های ثابت هماهنگ می‌گردند. مولفه گذرای جریان می‌تواند سبب عمل کرد سریع تر رله‌ها و در نتیجه به وجود آمدن ناهماهنگی بین رله‌های اصلی و پشتیبان شود. در این مقاله روشی جهت هماهنگی رله‌ها با در نظر گرفتن مولفه گذرای جریان اتصال کوتاه ارائه می‌شود. جهت مدل سازی تأثیر مولفه گذرای جریان اتصال کوتاه از مدل دینامیکی رله‌های معکوس زمانی استفاده می‌شود. در این روش به محاسبه^۱ TSM و^۲ Ip رله‌ها با رعایت قیود هماهنگی پرداخته می‌شود. نشان داده خواهد شد که با وارد کردن Ip به مسئله بهینه سازی، تابع هدف کاهش می‌یابد ولی ناهماهنگی بین رله‌ها به دلیل وجود مولفه گذرای جریان افزایش می‌یابد. جهت ایجاد هماهنگی بین رله‌ها از الگوریتم بهینه سازی ژنتیک بهره گرفته شده است. روش پیشنهادی و روش متعارف هماهنگی هم روی شبکه شعاعی و هم شبکه حلقوی پیاده سازی می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: هماهنگی حفاظتی، رله اضافه‌جریان جهت دار، مدل دینامیکی رله معکوس زمانی، الگوریتم بهینه سازی ژنتیک، جریان‌های گذرا، منابع تولید پراکنده.

Optimal Coordination of Overcurrent Relays Considering Generators Transient Currents

Mahdi Ghotbi Maleki¹, PhD Student; Reza Mohammadi², Assistant Professor; Hamid Javadi³, Assistant Professor

- 1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran, Email: m_ghotbi@sbu.ac.ir
 2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran, Email: re_mohammadi@sbu.ac.ir
 3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran, Email: javadi@pwut.ac.ir

Abstract: Short-circuit current in the power networks, consists of steady and transient states. In the conventional relay coordination method, the transient component of short-circuit current is ignored and the relays are coordinated via fixed currents. The transient component of short-circuit currents causes relays operate fast and thus miscoordination appear between the main and backup pair relays. In this paper, a relay coordination method considering the transient component of short-circuit current is presented. Dynamic model of inverse time overcurrent relay is used to calculate operating time of relays. In the proposed method, both TSM and Ip of relays are calculated considering coordination constraints. It is shown that when the Ip is entered to the optimization problem, the objective function is reduced but miscoordination between relays are increased because of the transient component of short-circuit current. Genetic optimization algorithm is used for relays coordination. The proposed coordination method is implemented on a radial and a meshed network, and the results are compared with the conventional method of coordination.

Keywords: directional overcurrent relay, distributed generation (DG), inverse time relay's dynamic model, genetic algorithm, protection coordination, transient currents.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۸/۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱/۱

نام نویسنده مسئول: رضا محمدی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - دانشگاه شهید بهشتی - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دکتر رضا محمدی

۱- مقدمه

شبکه قدرت بزرگ‌ترین شبکه دینامیکی ساخته دست بشر است. با توجه به ماهیت دینامیکی شبکه قدرت انتظار می‌رود وقوع هر تغییری در شرایط شبکه بعد از گذشت مدت زمانی مشخص و با ازین رفتن حالات گذرا، تأثیر خود را در خروجی نشان دهد.

به دلیل سلسله‌مراتبی بودن شبکه‌های شعاعی، هماهنگی رله‌ها در این شبکه‌ها به راحتی صورت می‌گیرد ولی این مطلب برای شبکه‌های حلقوی صادق نیست. روش‌های مختلفی در زمینه هماهنگی رله‌ها در شبکه‌های حلقوی مطرح شده است. از جمله این روش‌های هماهنگی می‌توان به هماهنگی با استفاده از روش‌های بهینه ریاضی و هوشمند اشاره کرد. روش برنامه‌ریزی خطی [۱]، برنامه‌ریزی درجه دوم [۲]، برنامه‌ریزی باینری [۳] و الگوریتم نقطه داخلی [۴] از جمله روش‌های بهینه ریاضی به‌شمار می‌روند. از روش‌های هماهنگی بهینه هوشمند نیز می‌توان به الگوریتم ژنتیک [۵]، الگوریتم زیست جغرافی [۶]، الگوریتم تکاملی دیفرانسیلی [۷]، الگوریتم اجتماع مورچه‌ها [۸]، الگوریتم کرم شب‌تاب [۹] و الگوریتم جستجوگر [۱۰] برای به‌دست‌آوردن مقادیر I_p و TSM رله‌های معکوس زمانی اشاره کرد. در [۱۱] مقایسه‌ای بین الگوریتم‌های هوشمند انجام می‌گیرد.

بعضی مقالات با تعریف موارد تأثیرگذار در هماهنگی رله‌ها، قیود جدیدی برای مسئله هماهنگی تعریف می‌کنند. در شبکه‌های انتقال حفاظت اضافه‌جریان به عنوان پشتیبان حفاظت دیستانس مورد استفاده قرار می‌گیرد. در [۱۵-۱۲] هماهنگی بین رله‌های اضافه‌جریان و دیستانس مورد مطالعه قرار می‌گیرند. در [۱۶] هماهنگی رله‌های اضافه‌جریان دارای ولتاژهای مختلف واقع در دو سر یک ترانسفورماتور مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در [۱۷] هماهنگی رله‌ها با در نظر گرفتن توپولوژی‌های مختلف یک شبکه مورد تحقیق قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه در شبکه‌های به هم پیوسته ممکن است تمام محدودیت‌های هماهنگی رعایت نشود، در [۱۸، ۱۹] روشی جهت حذف برخی از این محدودیت‌ها و تعیین کوچک‌ترین مجموعه نقاط شکست ارائه می‌شود. در [۲۰] تابع هدفی جدید برای مسئله بهینه‌سازی مورد استفاده در تعیین کوچک‌ترین مجموعه نقاط شکست ارائه شده است. در [۲۱] رله‌های اضافه‌جریان با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های بار، امپدانس تجهیزات، مکان وقوع اتصال کوتاه، مقاومت خطا و خطای اندازه‌گیری ترانسورماتور جریان، هماهنگ می‌شوند. نویسندگان در [۲۲] به هماهنگی شبکه‌ها در حضور DG و تعیین مکان بهینه‌ای برای محدودسازی جریان اتصال کوتاه با در نظر گرفتن عدم قطعیت در توان تولیدی توربین بادی می‌پردازند.

بعضی مقالات نیز هستند که با بهره‌گیری از طرح‌های ابتکاری، روش‌های جدیدی جهت هماهنگی رله‌ها به وجود آورده‌اند. در [۲۳] با استفاده از روش هماهنگی شش جفت جریان اتصال کوتاه و با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک ایجاد هماهنگی بین رله‌ها پرداخته

شده است. نویسندگان در [۲۴] با اعمال تغییراتی در رابطه مشخصه رله‌های معکوس زمانی و حذف وابستگی این رابطه به مقدار TSM، از الگوریتم ژنتیک جهت یافتن مقادیر بهینه تنظیم زمانی و هماهنگی بین رله‌ها استفاده کرده‌اند. برای دستیابی به نتایج بهتر در هماهنگی رله‌ها، منحنی‌های استاندارد [۲۵] و غیراستاندارد [۲۶] نیز وارد مسائل بهینه‌سازی شده است.

مقالاتی که در زمینه هماهنگی رله‌ها بیان شده‌اند از جریان‌های اتصال کوتاه ثابت جهت ایجاد هماهنگی استفاده می‌کنند و مولفه گذرای جریان را در نظر نمی‌گیرند. هنگام به کارگیری FCL ، تشخیص وقوع اتصال کوتاه و محدودسازی جریان اتصال کوتاه با تأخیری زمانی همراه است. در طول این زمان، جریان اتصال کوتاه لحظه‌ای از رله‌ها عبور خواهد کرد. مرجع [۲۷] به بررسی تأثیر حالت گذرای FCL و DG بر روی هماهنگی رله‌ها در شبکه‌های حلقوی می‌پردازد و روشی جهت هماهنگی رله‌ها در حضور حالات گذرای FCL و DG ارائه می‌نماید. روش ارائه شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک تنظیمات زمانی رله‌ها را محاسبه می‌کند.

در این مقاله روشی جهت هماهنگی رله‌های معکوس زمانی با در نظر گرفتن مولفه گذرای جریان اتصال کوتاه ارائه می‌شود. در ابتدا با استفاده از مدل دینامیکی رله معکوس زمانی و جریان اتصال کوتاه لحظه‌ای، مقادیر TSM بر حسب زمان به صورت منحنی‌هایی نشان داده می‌شوند. سپس نحوه به کارگیری این منحنی‌ها جهت ایجاد هماهنگی بین رله‌ها در شبکه‌های شعاعی و حلقوی بیان می‌گردد. در ادامه روشی جهت محاسبه مقادیر TSM و I_p رله‌های معکوس زمانی در شبکه‌های شعاعی و حلقوی بیان می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک برای به‌دست‌آوردن تنظیمات بهینه رله‌ها استفاده شده است.

۲- طرح مسئله

سیستم شکل ۱ را در نظر بگیرید. محدودیت‌های مربوط به رله اصلی ۱ و رله پشتیبان ۲ جهت ایجاد هماهنگی بین آن‌ها به صورت زیر است:

$$\Delta t_{F1} = t_{R2}(I_{F1}) - t_{R1}(I_{F1}) \geq CTI \quad (1)$$

که $t_{R1}(I_{F1})$ زمان عمل کرد رله به‌ازای حداکثر جریان اتصال کوتاه حالت دائم در نقطه F1 و CTI فاصله زمانی بحرانی برای هماهنگی است. Δt_{F1} در شکل ۲ نشان‌دهنده اختلاف زمان عمل کرد بین جفت رله اصلی و پشتیبان به‌ازای جریان اتصال کوتاه I_{F1} است.

در صورتی که جریان اتصال کوتاه گذرا I'_{F1} از رله‌ها عبور کند طبق شکل ۲ فاصله زمانی عمل کرد رله‌ها اصلی و پشتیبان کاهش خواهد یافت. بنابراین با افزایش جریان اتصال کوتاه، قید (۱) معتبر نخواهد بود و قید (۲) باید به عنوان محدودیت هماهنگی رله‌ها در نظر گرفته شود.

TSM تنظیم زمانی رله، I جریان اتصال کوتاه لحظه‌ای، I_p تنظیم جریانی رله و a ، b و t_r پارامترهای مربوط به مشخصه‌های مختلف رله‌ها هستند. رابطه (۳) می‌تواند به صورت (۶) نیز نوشته شود. از آنجاکه رابطه (۶) رابطه‌ای بین t و TSM است، بنابراین می‌توان از آن جهت ایجاد هماهنگی بین رله‌ها در حالت گذرا استفاده کرد. بدین صورت که با استفاده از جریان‌های لحظه‌ای اتصال کوتاه و رابطه (۶) منحنی‌هایی به وجود می‌آیند که در این منحنی‌ها محور افقی شامل زمان و محور عمودی شامل مقادیر TSM هستند. نحوه تشکیل این منحنی‌ها و همچنین به کارگیری آن‌ها جهت هماهنگی رله‌ها در بخش بعدی توضیح داده خواهد شد.

$$\int_{t_0}^t \left(\frac{I}{I_p} \right)^b - 1 dt = TSM \quad I > I_p \quad (6)$$

۴- روش جدید برای هماهنگی رله‌ها در حالت گذرا

در این بخش به چگونگی به وجود آوردن منحنی‌های ROS^* و همچنین نحوه استفاده از آن‌ها جهت برقراری هماهنگی بین یک جفت رله اصلی و پشتیبان پرداخته می‌شود. فرض شود اتصال کوتاه سه‌فازی در جلوی هر رله اصلی اتفاق افتاده است. جریان‌های دیده‌شده از جانب رله‌های اصلی در هر بازه زمانی در ماتریس I_M (۷) و برای رله‌های پشتیبان در ماتریس I_B (۸) ذخیره می‌شوند. ماتریس‌های I_M و I_B پس از تخمین فازور و حذف مولفه dc تبدیل به ماتریس‌های RMS_M (۹) و RMS_B (۱۰) می‌گردند. در این روش محدودیتی روی روش‌های تخمین فازور و حذف مولفه dc وجود ندارد و هر روشی به این منظور قابل استفاده است.

$$I_M = \begin{bmatrix} I_{m1}(t_1) & I_{m1}(t_2) & \dots & I_{m1}(t_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_{mk}(t_1) & I_{mk}(t_2) & \dots & I_{mk}(t_n) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$I_B = \begin{bmatrix} I_{b1}(t_1) & I_{b1}(t_2) & \dots & I_{b1}(t_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_{bk}(t_1) & I_{bk}(t_2) & \dots & I_{bk}(t_n) \end{bmatrix} \quad (8)$$

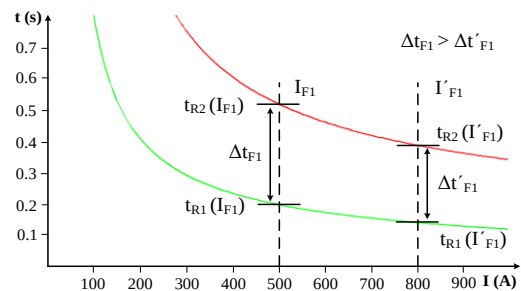
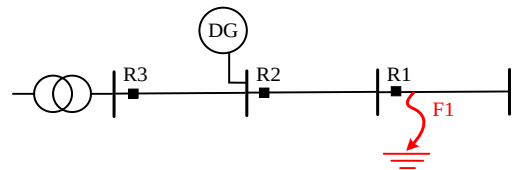
$$RMS_M = \begin{bmatrix} RMS_{m1}(t_1) & RMS_{m1}(t_2) & \dots & RMS_{m1}(t_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ RMS_{mk}(t_1) & RMS_{mk}(t_2) & \dots & RMS_{mk}(t_n) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$RMS_B = \begin{bmatrix} RMS_{b1}(t_1) & RMS_{b1}(t_2) & \dots & RMS_{b1}(t_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ RMS_{bk}(t_1) & RMS_{bk}(t_2) & \dots & RMS_{bk}(t_n) \end{bmatrix} \quad (10)$$

به ازای هر سطر ماتریس‌های RMS_M و RMS_B و به کارگیری روابط (۱۱) و (۱۲)، سطری متناظر در ماتریس‌های ROS_M (۱۳) و ROS_B (۱۴) حاصل می‌شوند.

$$ROS_m(t) = \int_0^t \left(\frac{RMS_m(t)}{I_p} \right)^b - 1 dt \quad RMS_m(t) > I_p \quad (11)$$

$$\Delta t'_{F1} = t_{R2}(I'_{F1}) - t_{R1}(I'_{F1}) \geq CTI \quad (2)$$



شکل ۲: منحنی مشخصه جفت رله اصلی و پشتیبان

وجود حالات گذرا در جریان اتصال کوتاه سبب افزایش مقدار rms جریان اتصال کوتاه می‌شود. باتوجه به اینکه زمان عمل کرد رله‌های معکوس زمانی برخلاف رله‌های آبی وابسته به مقدار جریان اتصال کوتاه است، وجود حالات گذرای جریان سبب افزایش سرعت عمل کرد رله‌های معکوس زمانی و کاهش زمان عمل کرد آن‌ها می‌شود. با توجه به شکل ۲ کاهش زمان عمل کرد رله‌های معکوس زمانی ممکن است سبب کاهش اختلاف زمان عمل کرد جفت رله‌های اصلی و پشتیبان به کمتر از CTI و به هم خوردن هماهنگی بین رله‌ها شود.

۳- مدل دینامیکی رله اضافه‌جریان

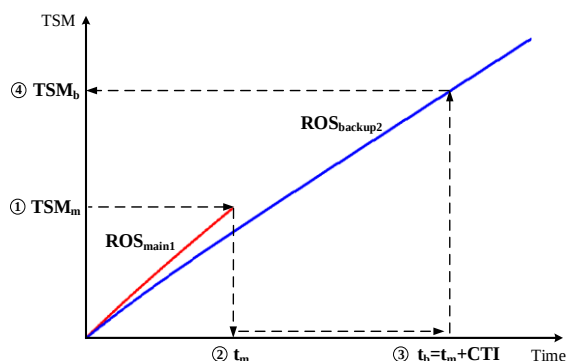
در استاندارد IEEE C37.112-1996 [۲۸] همانند (۳) با انتگرال‌گیری از منحنی مشخصه رله‌های آنالوگ معکوس زمانی، زمان عمل کرد آن‌ها محاسبه می‌شود. رابطه $F1$ در (۴) نشان‌دهنده منحنی مشخصه trip رله و $F2$ در (۵) نشان‌دهنده منحنی مشخصه reset رله است. جریان اتصال کوتاهی که در این روابط مورد استفاده قرار می‌گیرد جریان اتصال کوتاه لحظه‌ای بوده و به همین خاطر حالات گذرای جریان اتصال کوتاه را در خود دارد.

$$\int_{t_0}^t \left(\frac{1}{F_1(I)} - \frac{1}{F_2(I)} \right) dt = 1 \quad (3)$$

$$F_1(I) = \frac{a \times TSM}{\left(\frac{I}{I_p} \right)^b - 1} \quad I > I_p \quad (4)$$

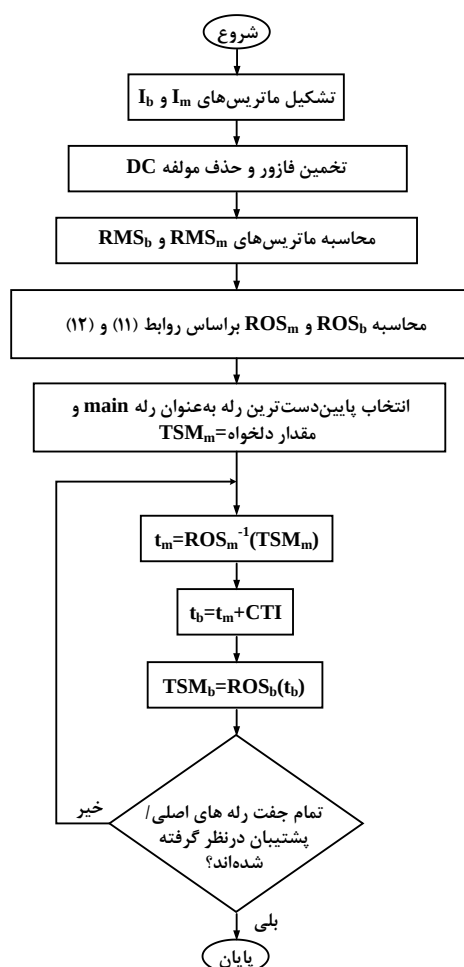
$$F_2(I) = \frac{t_r \times TSM}{1 - \left(\frac{I}{I_p} \right)^2} \quad I < I_p \quad (5)$$

اصلی ۱، زمان عمل‌کرد رله پشتیبان ۲ و TSM رله پشتیبان ۲ نیز به‌دست می‌آید. هماهنگی به‌این ترتیب ادامه می‌یابد. فلوچارت شکل ۵ نیز نحوه ایجاد هماهنگی در حالت کلی بین یک جفت رله اصلی و پشتیبان در یک شبکه شعاعی را بیان می‌دارد.



شکل ۴: نحوه به‌دست‌آوردن TSM رله پشتیبان در شبکه شعاعی از

روی منحنی‌های ROS



شکل ۵: فلوچارت هماهنگی دوبه‌دوی رله‌های اضافه‌جریان در شبکه شعاعی

$$ROS_b(t) = \int_0^t \left(\frac{RMS_b(t)}{I_p} \right)^b - 1 dt \quad RMS_b(t) > I_p \quad (12)$$

$$ROS_M = \begin{bmatrix} ROS_{m1}(t_1) & ROS_{m1}(t_2) & \dots & ROS_{m1}(t_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ ROS_{mK}(t_1) & ROS_{mK}(t_2) & \dots & ROS_{mK}(t_n) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$ROS_B = \begin{bmatrix} ROS_{b1}(t_1) & ROS_{b1}(t_2) & \dots & ROS_{b1}(t_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ ROS_{bK}(t_1) & ROS_{bK}(t_2) & \dots & ROS_{bK}(t_n) \end{bmatrix} \quad (14)$$

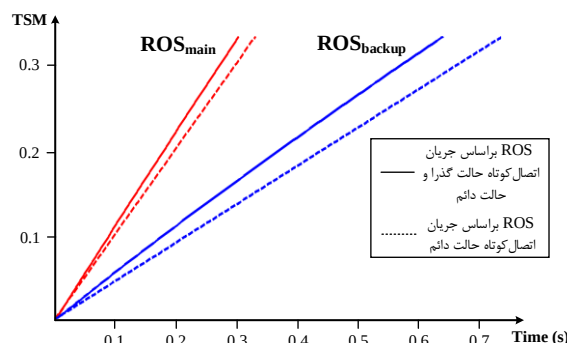
شکل ۳ منحنی‌های ROS اصلی و پشتیبان به‌ازای وقوع اتصال کوتاهی در ناحیه حفاظتی رله اصلی را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن TSM برای رله‌های اصلی و پشتیبان زمان عمل‌کرد رله‌ها با استفاده از روابط (۱۶) و (۱۷) به‌دست می‌آیند. در این حالت محدودیت مربوط به هماهنگی جفت رله‌های اصلی و پشتیبان برابر با (۱۵) خواهد بود.

$$\Delta t_{mb} = t_b - t_m \geq CTI \quad (15)$$

$$t_b = ROS_b^{-1}(TSM_b) \quad (16)$$

$$t_m = ROS_m^{-1}(TSM_m) \quad (17)$$

در ادامه نحوه هماهنگی رله‌ها در این شبکه‌های شعاعی و حلقوی شرح داده می‌شود.



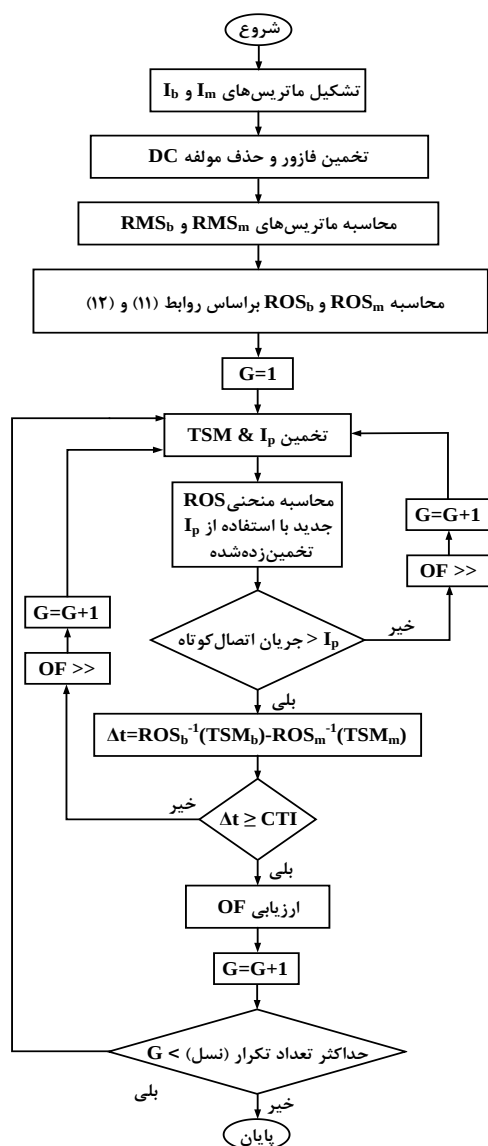
شکل ۳: منحنی‌های ROS مربوط به یک جفت رله اصلی و پشتیبان

۴-۱- هماهنگی دوبه‌دوی رله‌های اضافه‌جریان در شبکه شعاعی:

هدف به‌دست‌آوردن مقادیر TSM با فرض ثابت‌بودن I_p رله‌ها است. ابتدا فرض می‌شود اتصال کوتاه سه‌فازی در جلوی رله اصلی ۱ در شکل ۱ وجود دارد. در این صورت با استفاده از جریان‌های دیده‌شده از جانب رله اصلی ۱ و رله پشتیبان ۲ و با بهره‌گیری از روابط (۱۱) و (۱۲) منحنی‌های ROS_{main1} و $ROS_{backup2}$ به‌دست می‌آیند. شکل ۴ نشان‌دهنده این دو منحنی هست.

از پایین‌دست‌ترین رله هماهنگی آغاز می‌شود. بدین‌صورت که مقدار TSM برای رله ۱ برابر یک مقدار دلخواه و معمولاً برابر با کمترین مقدار TSM انتخاب می‌شود. سپس براساس شکل ۴ زمان عمل‌کرد رله

الگوریتم بهینه‌سازی حاصل شده‌است. در آغاز داده‌های موجود در ماتریس‌های I_M (۷) و I_B (۸) پس از تخمین فازور و حذف مولفه dc تبدیل به ماتریس‌های RMS_M (۹) و RMS_B (۱۰) می‌گردند. سپس با استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲)، ماتریس‌های ROS_M (۱۳) و ROS_B (۱۴) براساس یک اولیه ایجاد می‌گردند. سپس با هر مقداری که الگوریتم بهینه‌سازی برای I_P تولید می‌کند، منحنی‌های ROS براساس (۱۹) تغییر می‌کنند. با استفاده از منحنی ROS جدید و TSM ای که الگوریتم بهینه‌سازی تولید کرده‌است، زمان عمل‌کرد رله‌های اصلی و پشتیبان براساس (۱۶) و (۱۷) محاسبه می‌گردند. اگر قیود مسئله بهینه‌سازی برقرار نباشد، تابع هدف عددی بزرگ انتخاب می‌گردد تا الگوریتم بهینه‌سازی متوجه شود اعداد تولیدی‌اش مناسب نبودند ولی اگر قیود برقرار شوند، تابع هدف از طریق (۱۸) محاسبه می‌گردد. هدف الگوریتم بهینه‌سازی یافتن I_P و TSM ای برای رله‌ها است که سبب شوند تابع هدف کمترین مقدار ممکن شود.



شکل ۶: فلوچارت عمل‌کرد الگوریتم بهینه‌سازی جهت ایجاد هماهنگی بین رله‌ها

۴-۲- هماهنگی بهینه رله‌های اضافه‌جریان با در نظر گرفتن

تنظیم زمانی و جریانی در شبکه شعاعی و حلقوی

جهت محاسبه مقادیر TSM و I_P برای هر رله نیاز به الگوریتم بهینه‌سازی خواهد بود. تابع هدف برای مسئله هماهنگی رله‌ها از دو قسمت تشکیل شده‌است. قسمت اول، حاصل جمع توان دوم زمان عمل‌کرد رله‌ها به‌ازای حداکثر اتصال کوتاه در ناحیه حفاظتی خود رله‌ها و قسمت دوم، تابع جریمه است و زمانی مقدار می‌گیرد که اختلاف زمان عمل‌کرد جفت رله اصلی و پشتیبان کمتر از CTI باشد. تابع هدف در رابطه (۱۸) نشان داده شده‌است.

$$OF = \alpha_1 \times \sum_{i=1}^{nr} t_i^2 + \alpha_2 \times \sum_{i=1}^{nc} ((\Delta t_{mb} - CTI) - |\Delta t_{mb} - CTI|)^2 \quad (18)$$

در (۱۸)، t_i زمان عمل‌کرد رله به‌ازای حداکثر اتصال کوتاه در ناحیه حفاظتی خود براساس رابطه (۱۷) و Δt_{mb} اختلاف زمان عمل‌کرد جفت رله‌های اصلی و پشتیبان به‌ازای حداکثر جریان اتصال کوتاه در ناحیه حفاظتی رله اصلی براساس رابطه (۱۵) است. تغییر ضرایب α_1 و α_2 سبب تغییر اولویت در بهینه‌سازی برای هر کدام از دو قسمت تابع هدف می‌گردد.

الگوریتم بهینه‌سازی باید با استفاده از منحنی‌های ROS_m و ROS_b قید هماهنگی (۱۵) برقرار نماید. مشکل اساسی در این است که منحنی‌های ROS_m و ROS_b با در نظر گرفتن I_P ‌های خاص به‌دست آمده‌اند. با تغییر مقدار I_P نیاز است ماتریس‌های ROS_M و ROS_B توسط (۱۱) و (۱۲) و براساس I_P جدید محاسبه شوند که این امر در حین شبیه‌سازی بسیار وقت‌گیر است و حجم محاسبات را بسیار افزایش می‌دهد. بنابراین در ادامه سعی می‌شود با استفاده از منحنی ROS به‌دست آمده براساس I_{P1} منحنی ROS برای I_{P2} نیز محاسبه شود.

$$\int_{t_0}^t \frac{(I_p^b)^b - 1}{a} dt = ROS$$

$$\frac{\int_{t_0}^t I_p^b dt}{I_{p1}^b} - \int_{t_0}^t dt = a \times ROS$$

اگر t_0 برابر با صفر در نظر گرفته شود می‌توان نوشت:

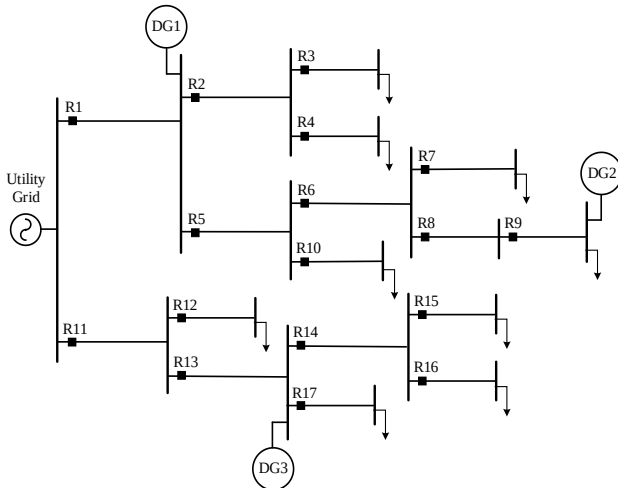
$$\int_0^t I_p^b dt = (a \times ROS_1 + t) \times I_{p1}^b = (a \times ROS_2 + t) \times I_{p2}^b \quad (19)$$

$$ROS_2 = ROS_1 \times \left(\frac{I_{p1}}{I_{p2}} \right)^b + \frac{t}{a} \times \left[\left(\frac{I_{p1}}{I_{p2}} \right)^b - 1 \right]$$

فلوچارت شکل ۶ نحوه عمل‌کرد الگوریتم بهینه‌سازی با در نظر گرفتن (۱۸) به‌عنوان تابع هدف و (۱۵) به‌عنوان محدودیت را نشان می‌دهد. فلوچارت شکل ۶ از ترکیب مراحل روش پیشنهادی و

۵- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

این بخش به بررسی روش پیشنهادی در هماهنگی رله‌ها اختصاص دارد. از دو شبکه شعاعی و حلقوی بهره گرفته می‌شود. رله‌های مورد استفاده در این مقاله، رله‌های دیجیتال جهت‌دار هستند. الگوریتم مورد استفاده جهت تخمین فازور، الگوریتم DFT و روش مورد استفاده جهت حذف مولفه DC روشی بر پایه DFT و ارائه شده در [۲۹] است. تعداد نمونه‌گیری جهت تخمین فازور نیز ۲۰ نمونه در هر سیکل قدرت است. مقادیر TSM بین ۰/۵ و ۲، مقادیر I_p بین ۰/۵ تا ۴ برابر جریان نامی CT و منحنی مشخصه رله‌ها از نوع N $\bar{I}$ هستند. مقدار CTI برابر با ۰/۳ s، α_1 و α_2 در تابع هدف (۱۹) به ترتیب برابر با ۱ و ۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده در این مقاله نیز الگوریتم ژنتیک است.



شکل ۷: شبکه شعاعی ۱۸ باس سیرجان

۵-۱- هماهنگی رله‌ها در شبکه شعاعی

جهت پیاده‌سازی روش پیشنهادی روی یک شبکه شعاعی، از شبکه ۱۸ باس سیرجان شکل ۷ استفاده می‌شود [۳۰]. ۳ منبع تولید پراکنده با ظرفیت‌های ۵MVA، ۳MVA و ۴MVA از طریق سه ترانسفورمر با امپدانس ۰/۵ pu و توان‌هایی برابر با حداکثر توان DG متصل شده به خود نیز به این شبکه توزیع متصل شده‌اند. اطلاعات مربوط به DGها در جدول ۱ ذکر شده‌اند. DG1 و DG3 از نوع دیزل ژنراتور و DG2 از نوع مزرعه بادی است. جریان نامی CTهای شبکه شعاعی ۵۰A در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱: اطلاعات مربوط به DGهای شبکه شعاعی

DG3	DG1	داده‌های ژنراتور سنکرون
۱ pu	۱/۱ pu	راکتانس اشباع نشده (X_d)
۰/۱۶ pu	۰/۲ pu	راکتانس گذرای اشباع نشده (X'_d)
۰/۱۲ pu	۰/۱۵ pu	راکتانس زیرگذرای اشباع نشده (X''_d)
۲ s	۱ s	ثابت زمانی گذرای اشباع نشده (T'_{d0})
۰/۲ s	۰/۱۵ s	ثابت زمانی زیرگذرای اشباع نشده (T''_{d0})
DG2		داده‌های ژنراتور آسنکرون
۰/۱ pu		راکتانس زیرگذرای اشباع نشده استاتور (X''_s)
۰/۱۱ s		ثابت زمانی زیرگذرای اشباع نشده استاتور (T'_s)
۰/۵ s		ثابت زمانی زیرگذرای اشباع نشده روتور (T'_r)
۰/۲		فاکتور نشت (σ)

جدول ۲: اطلاعات مربوط به جفت رله‌های اصلی و پشتیبان در شبکه شعاعی

جفت رله	جفت رله	جفت رله	جفت رله	جفت رله
جفت رله	جفت رله	جفت رله	جفت رله	جفت رله
۱	۴۵۴	۱۷۰	-	-
۲	۷۰۵	۲۲۰	۴۱۱	۱
۳	۶۹۰	۱۰۰	۶۹۰	۲
۴	۶۹۰	۱۱۰	۶۹۰	۲
۵	۵۷۱	۲۲۰	۴۱۱	۱
۶	۵۲۴	۱۷۰	۵۲۴	۵
۷	۶۱۸	۱۲۰	۴۷۴	۶
۸	۴۷۴	۱۲۰	۴۷۴	۶
۹	۴۲۷	۸۰	۴۲۷	۸
۱۰	۶۶۴	۱۰۰	۵۲۴	۵
۱۱	۵۸۵	۲۲۰	-	-
۱۲	۶۷۷	۱۰۰	۵۳۰	۱۱
۱۳	۵۳۰	۱۹۰	۵۳۰	۱۱
۱۴	۶۲۷	۱۵۰	۴۷۳	۱۳
۱۵	۵۶۴	۱۰۰	۵۶۴	۱۴
۱۶	۵۶۴	۱۱۰	۵۶۴	۱۴
۱۷	۶۲۷	۷۰	۴۷۳	۱۳

۵-۱-۱- هماهنگی دوبه‌دو رله‌های جریانی در شبکه شعاعی:

در این مرحله IP رله‌ها ثابت در نظر گرفته می‌شود و مقادیر TSM رله‌ها از طریق روش هماهنگی دوبه‌دو حالت ماندگار و دوبه‌دو حالت گذرا محاسبه می‌شوند. جدول ۲ علاوه بر نشان دادن جفت رله‌های اصلی و پشتیبان شبکه، رله‌ها و حداکثر جریان اتصال کوتاه رله‌های اصلی و پشتیبان هنگام وقوع اتصال کوتاه در ناحیه حفاظتی رله اصلی بعد از سپری شدن حالات گذرای جریان را نشان می‌دهد. با استفاده از TSMهای به‌دست‌آمده از طریق روش متعارف، اختلاف زمان عمل کرد بین جفت رله‌های اصلی و پشتیبان از طریق نمودارهای ROS و روابط (۱۶) و (۱۷) تعیین می‌شود. در حالت عادی این مقدار باید حداقل به میزان CTI باشد ولی همان‌گونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود بعضی از این مقادیر کمتر از CTI هستند.

۵-۱-۲- هماهنگی بهینه رله‌های اضافه‌جریان با در نظر گرفتن تنظیم جریانی در شبکه شعاعی

هدف محاسبه دو مقدار TSM و I_p برای هر کدام از رله‌ها است. به دلیل حجم بالای محاسبات نیاز به استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی خواهد بود. هدف مسئله بهینه‌سازی به‌دست‌آوردن کم‌ترین مقدار برای تابع هدف (۱۸) با رعایت قیود (۱۵) است. مقادیر محاسبه شده TSM و I_p توسط روش حالت ماندگار و روش حالت گذرا در جدول ۴ آورده شده‌است.

از ۰/۳ یعنی مقدار CTI است. مشاهده می‌شود ناهماهنگی بین رله‌های اصلی و پشتیبان نسبت به جدول ۳ یعنی جایی که فقط TSM رله‌ها محاسبه می‌شود بیشتر شده‌است. نکته‌ای که از این نتایج به دست می‌آید به این صورت است که باین که وارد کردن تنظیم I_p به مسئله بهینه‌سازی سبب کاهش مقدار تابع هدف و در نتیجه زمان عمل‌کرد رله‌ها می‌شود ولی آسیب‌پذیری هماهنگی رله‌ها نسبت به حالات گذرای جریان اتصال کوتاه را افزایش می‌دهد.

۲-۵- هماهنگی رله‌ها در شبکه‌های حلقوی

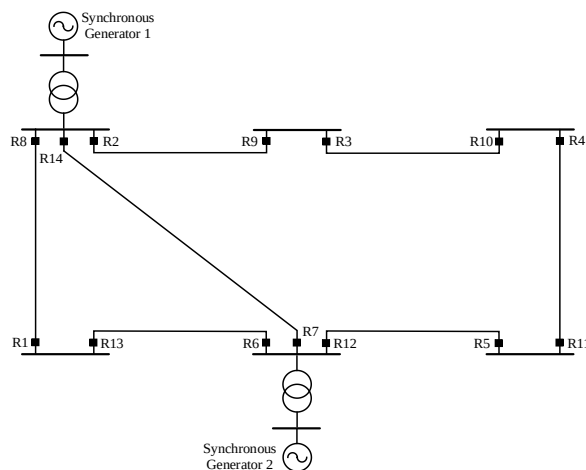
برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی جهت هماهنگی رله‌ها در شبکه‌های حلقوی از شبکه حلقوی ۸ باس شکل ۸ استفاده می‌شود [۲۴]. اطلاعات مربوط به ژنراتورهای شبکه در جدول ۵ و جفت رله‌های اصلی و پشتیبان، مقادیر I_p و حداکثر جریان اتصال کوتاه حالت ماندگار رله‌های اصلی و پشتیبان نیز در جدول ۶ ذکر شده‌اند. جریان نامی CT‌های شبکه حلقوی ۱۰۰ A در نظر گرفته می‌شود.

۱-۲-۵- هماهنگی رله‌ها در صورت ثابت ماندن مقادیر I_p

هدف در این بخش، محاسبه مقادیر TSM از طریق الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک است. مقادیر TSM به دست آمده از دو روش حالت ماندگار و حالت گذرا در جدول ۷ ذکر شده‌است. اختلاف زمان عمل‌کرد بین جفت رله‌های اصلی و پشتیبان در روش حالت ماندگار با استفاده از TSM‌های به دست آمده از این روش و رابطه (۱۵) محاسبه و آورده شده‌اند. مشاهده می‌شود قید وجود تأخیر زمانی به اندازه CTI بین زمان‌های عمل‌کرد جفت رله‌های اصلی و پشتیبان رعایت نشده‌است.

جدول ۵: اطلاعات مربوط به ژنراتورهای شبکه حلقوی

ژنراتور سنکرون ۱	ژنراتور سنکرون ۲	داده‌های ژنراتور
۰/۹ pu	۰/۸ pu	راکتانس اشباع نشده (X_d)
۰/۲۵ pu	۰/۳ pu	راکتانس گذرای اشباع نشده (X'_d)
۰/۲۷ pu	۰/۲۲ pu	راکتانس زیرگذرای اشباع نشده (X''_d)
۱/۷ s	۲ s	ثابت زمانی گذرای اشباع نشده (T'_{d0})
۰/۰۲ s	۰/۰۵ s	ثابت زمانی زیرگذرای اشباع نشده (T''_{d0})



شکل ۸: شبکه حلقوی ۸ باس

جدول ۳: TSM رله‌ها در شبکه شعاعی با ثابت فرض کردن I_p رله‌ها

رله		روش متعارف		روش پیشنهادی	
$C_{\text{پشتیبان}}$	$C_{\text{اصلی}}$	TSM رله اصلی	Δt (s)	TSM رله اصلی	Δt (s)
۱	-	۰/۱۵۴	-	۰/۱۷۶	-
۲	۱	۰/۰۸۱	۰/۶۸۲	۰/۱۰۹	۰/۷۲۳
۳	۲	۰/۰۵۰	۰/۱۸۵	۰/۰۵۰	۰/۳۰۷
۴	۲	۰/۰۵۰	۰/۱۷۹	۰/۰۵۰	۰/۳۰۱
۵	۱	۰/۱۲۵	۰/۳۹۴	۰/۱۷۰	۰/۳۰۲
۶	۵	۰/۱۱۴	۰/۱۷۶	۰/۱۴۶	۰/۳۰۲
۷	۶	۰/۰۵۰	۰/۳۹۷	۰/۰۵۰	۰/۵۷۳
۸	۶	۰/۰۹۳	۰/۱۹۷	۰/۱۱۱	۰/۳۰۲
۹	۸	۰/۰۵۰	۰/۲۲۲	۰/۰۵۰	۰/۳۰۲
۱۰	۵	۰/۰۵۰	۰/۵۳۲	۰/۰۵۰	۰/۸۱۶
۱۱	-	۰/۱۲۵	-	۰/۱۵۵	-
۱۲	۱۱	۰/۰۵۰	۰/۵۹۴	۰/۰۵۰	۰/۷۹۶
۱۳	۱۱	۰/۱۰۱	۰/۲۱۸	۰/۱۲۳	۰/۳۰۲
۱۴	۱۳	۰/۰۹۸	۰/۲۴۷	۰/۱۱۹	۰/۳۰۱
۱۵	۱۴	۰/۰۵۰	۰/۲۲۲	۰/۰۵۰	۰/۳۰۹
۱۶	۱۴	۰/۰۵۰	۰/۲۱۵	۰/۰۵۰	۰/۳۰۲
۱۷	۱۳	۰/۰۵۰	۰/۴۶۳	۰/۰۵۰	۰/۵۹۷
OF		۴/۷۳۳۱		۴/۴۵۶۸	

جدول ۴: TSM و I_p رله‌های شبکه شعاعی حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک

رله		روش متعارف		روش پیشنهادی	
$C_{\text{پشتیبان}}$	$C_{\text{اصلی}}$	رله اصلی		رله اصلی	
Δt (s)		I_p (A)	TSM	Δt (s)	
۱	-	۲۹۰	۰/۰۷۵	-	۲۹۰
۲	۱	۳۱۰	۰/۰۵۱	۲۹۰	۰/۰۷۵
۳	۲	۵۰	۰/۰۵۴	۸۰	۰/۰۷۵
۴	۲	۶۰	۰/۰۵۱	۷۰	۰/۰۷۵
۵	۱	۳۵۰	۰/۰۹۶	۳۵۰	۰/۰۹۶
۶	۵	۲۹۰	۰/۰۸۶	۲۹۰	۰/۰۸۶
۷	۶	۵۰	۰/۰۵۴	۵۰	۰/۰۵۴
۸	۶	۲۰۰	۰/۰۶۷	۲۰۰	۰/۰۶۷
۹	۸	۵۰	۰/۰۵۲	۷۰	۰/۰۵۲
۱۰	۵	۵۰	۰/۰۵۲	۷۰	۰/۰۵۲
۱۱	-	۲۵۰	۰/۰۸۴	-	۲۵۰
۱۲	۱۱	۶۰	۰/۰۵۴	۵۰	۰/۰۵۴
۱۳	۱۱	۲۹۰	۰/۰۷۴	۲۹۰	۰/۰۷۴
۱۴	۱۳	۲۶۰	۰/۰۷۷	۲۵۰	۰/۰۷۷
۱۵	۱۴	۵۰	۰/۰۵۶	۶۰	۰/۰۵۶
۱۶	۱۴	۵۰	۰/۰۵۰	۵۰	۰/۰۵۰
۱۷	۱۳	۵۰	۰/۰۵۲	۵۰	۰/۰۵۲
OF		۲/۹۷۴۹		۳/۲۱۸۸	

اختلاف زمان عمل‌کرد جفت رله‌های اصلی و پشتیبان در حالت ماندگار با استفاده از مقادیر به دست آمده از این روش و رابطه (۱۵) محاسبه و در جدول نشان داده شده‌است. برخی از اختلاف زمان‌ها کمتر

جدول ۶: اطلاعات مربوط به جفت رله‌های اصلی و پشتیبان در شبکه

رله اصلی	جریان اتصال کوتاه (A)	جریان I_p (A)	رله پشتیبان	جریان اتصال کوتاه (A)
۱	۱۹۶۱	۱۲۰	۶	۱۹۶۱
۲	۳۸۳۲	۸۰۰	۱	۵۶۶
۳	۲۵۲۱	۶۰۰	۷	۱۰۷۵
۴	۱۷۱۲	۲۱۰	۲	۲۵۲۱
۵	۱۰۲۷	۱۰۰	۳	۱۷۱۲
۶	۳۵۰۳	۵۵۰	۴	۱۰۲۷
۷	۲۹۶۲	۲۲۰	۵	۳۰۷
۸	۳۵۵۶	۵۵۰	۱۴	۱۱۴۲
۹	۱۰۸۴	۱۰۰	۵	۳۰۷
۱۰	۱۷۷۳	۲۲۰	۱۳	۶۰۱
۱۱	۲۶۰۳	۶۵۰	۷	۱۰۷۵
۱۲	۳۷۹۷	۵۵۰	۹	۲۸۹
۱۳	۱۸۵۵	۱۲۰	۱۰	۱۰۸۴
۱۴	۳۰۴۷	۲۳۰	۱۱	۱۷۷۳
			۱۲	۲۶۰۳
			۱۳	۶۰۱
			۱۴	۱۱۴۲
			۸	۱۸۵۵
			۱	۵۶۶
			۹	۲۸۹

جدول ۷: TSM به دست آمده از الگوریتم ژنتیک برای رله‌های شبکه

حلقوی با فرض ثابت بودن مقادیر I_p رله‌ها

رله	روش متعارف	روش پیشنهادی
Δt (s)	TSM رله اصلی	TSM رله اصلی
۱	۰/۲۱۵	۰/۲۸۱
۲	۰/۱۵۰	۰/۲۰۱
۳	۰/۱۲۶	۰/۱۷۶
۴	۰/۱۶۴	۰/۲۲۴
۵	۰/۱۴۲	۰/۲۰۱
۶	۰/۱۵۱	۰/۲۰۷
۷	۰/۰/۲۲۰	۰/۲۸۰
۸	۰/۱۵۶	۰/۲۱۱
۹	۰/۱۴۱	۰/۲۰۷
۱۰	۰/۱۶۲	۰/۲۲۰
۱۱	۰/۱۲۰	۰/۱۷۰
۱۲	۰/۲۰۱	۰/۲۶۳
۱۳	۰/۲۳۷	۰/۳۰۷
۱۴	۰/۲۳۶	۰/۳۰۹
OF	۴/۶۲۷۳	۶/۹۰۷۶

۲-۲-۵- هماهنگی رله‌ها با استفاده از متغیرهای TSM و I_p

جهت کاهش تابع هدف می‌توان I_p را نیز در معادلات وارد کرد و این پارامتر را نیز برای هر رله به صورت بهینه به دست آورد. مقادیر TSM و I_p به دست آمده از طریق روش‌های متعارف و پیشنهادی در جدول ۸ ذکر شده است.

جدول ۸: TSM و I_p رله‌های شبکه حلقوی حاصل از الگوریتم

بهینه‌سازی ژنتیک

رله	روش متعارف	روش پیشنهادی
Δt (s)	TSM رله اصلی	TSM رله اصلی
۱	۰/۰۵۰	۰/۰۹۵
۲	۰/۱۱۳	۰/۱۶۸
۳	۰/۰۶۴	۰/۱۰۵
۴	۰/۰۵۰	۰/۰۸۵
۵	۰/۰۵۰	۰/۰۹۸
۶	۰/۰۶۵	۰/۱۰۴
۷	۰/۰۵۰	۰/۰۷۸
۸	۰/۰۶۳	۰/۱۰۸
۹	۰/۰۵۰	۰/۰۹۲
۱۰	۰/۰۵۰	۰/۰۸۲
۱۱	۰/۰۶۷	۰/۱۱۲
۱۲	۰/۱۱۸	۰/۱۸۷
۱۳	۰/۰۵۰	۰/۱۰۰
۱۴	۰/۰۵۰	۰/۰۸۹
OF	۱/۴۴۶۰	۲/۹۷۴۰

در جدول ۸، اختلاف زمان‌های عمل کرد جفت رله‌های اصلی و پشتیبان در حالت ماندگار با استفاده از مقادیر به دست آمده از روش حالت ماندگار و از طریق منحنی‌های ROS_m و ROS_b براساس رابطه (۱۵) محاسبه شده‌اند. همان گونه که مشخص است در صورت وجود حالات گذرا هماهنگی به وجود آمده بین رله‌ها از بین خواهد رفت. با مقایسه Δt ‌های روش حالت ماندگار و همچنین OF در جداول ۷ و ۸، مشخص می‌شود که هر چند تعیین I_p از طریق الگوریتم بهینه‌سازی سبب کاهش تابع هدف می‌شود ولی به سبب وجود حالات گذرای جریانی در جریان اتصال کوتاه، باعث تشدید ناهماهنگی بین رله‌های اصلی و پشتیبان می‌شود.

همان طور که با مقایسه مقادیر به دست آمده از دو روش حالت ماندگار و حالت گذرا پیاده‌سازی شده روی دو شبکه شعاعی و حلقوی مشاهده شد، تأثیر حالات گذرا بر روی زمان عمل کرد رله‌ها قابل صرف نظر نیست و باید وجود حالات گذرا در جریان اتصال کوتاه در هماهنگی رله‌ها نیز لحاظ شود.

۶- نتیجه‌گیری

به سبب تأثیراتی که مولفه گذرای جریان اتصال کوتاه در همانگی رله‌ها می‌گذارد در این مقاله روشی جهت همانگی رله‌های معکوس زمانی با در نظر گرفتن این مولفه گذرا ارائه شده است. این روش با استفاده از منحنی‌های به دست آمده از مدل دینامیکی رله معکوس زمانی و الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، سعی در به دست آوردن مقادیر I_p و TSM برای رله‌ها به کار گرفته در شبکه‌های شعاعی و حلقوی دارد. مقایسه نتایج به دست آمده از دو روش متعارف و پیشنهادی نشان دهنده رعایت نشدن بعضی قیود همانگی در صورت استفاده از روش متعارف است. این ناهمانگی در حالتی که مقدار I_p نیز وارد مسئله بهینه‌سازی می‌شود افزایش می‌یابد. بنابراین تعیین I_p از طریق الگوریتم بهینه‌سازی بالاین که سبب کاهش زمان عمل کرد رله‌ها می‌شود ولی همانگی رله‌ها را در مقابل تأثیر حالات گذرا آسیب پذیرتر می‌کند. بنابراین هنگام همانگی رله‌ها باید تأثیر مولفه گذرای جریان اتصال کوتاه نیز در نظر گرفته شود.

مراجع

- various characteristics for overcurrent relays,” in *Proc. Int. Conf. Power & Energy*, pp. 569-573, 2008.
- [13] R. Mohammadi, H. A. Abyaneh, S. S. H. Kamangar, and F. Razavi, “Optimal combined overcurrent and distance relays coordination incorporating intelligent overcurrent relays characteristic selection,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 26, no. 3, pp. 1381 - 1391, 2011.
- [14] D. L. A. Negrao, J. C. M. Vieira, “The Local Fit Method for Coordinating Directional Overcurrent Relays,” *IEEE Trans. Power Del.* vol. 31, no. 4, pp. 1464-1472, 2016.
- [15] Y. Damchi, J. Sadeh, H. R. Mashhadi, “Optimal coordination of distance and overcurrent relays considering a non-standard tripping characteristic for distance relays,” *IET Gen. Transm. Distrib.* vol. 10, no. 6, pp. 1448-1457, 2016.
- [16] S. S. H. Kamangar; H. A. Abyaneh, R. Mohammadi, and F. Razavi, “A new genetic algorithm method for optimal coordination of overcurrent and earth fault relays in networks with different levels of voltages,” in *Proc. Int. Conf. IEEE Bucharest*, pp. 1-5, 2009.
- [17] A. S. Noghabi, J. Sadeh, and H. R. Mashhadi, “Considering different network topologies in optimal overcurrent relay coordination using a hybrid GA,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 4, pp. 1857 - 1863, 2009.
- [18] H. Sharifian, H. A. Abyaneh, S. K. Salman, R. Mohammadi, and F. Razavi, “Determination of the minimum break point set using expert system and genetic algorithm,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, no. 3, pp. 1284 - 1295, 2010.
- [19] M. Meskin, A. Domijan, I. Grinberg, “Optimal co-ordination of overcurrent relays in the interconnected power systems using break points,” *Electr. Power Syst. Res.* vol. 127, pp. 53-63, 2015.
- [20] R. Mohammadi, H. A. Abyaneh, H. M. Rudsari, S. H. Fathi, and H. Rastegar, “Overcurrent relays coordination considering the priority of constraints,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 26, no. 3, pp. 1927 - 1938, 2011.
- [21] عباس صابری نوقابی، حامد بدرسیمایی، محسن فرشاد، “یک روش احتمالی به منظور تنظیم بهینه رله‌های اضافه‌جریان ترکیبی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها”، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۱، صفحه ۱۴۱-۱۵۳، بهار ۱۳۹۶.
- [22] رضا قربانی، کاظم مظلومی، “جایابی و تعیین ظرفیت بهینه محدودساز جریان خطا با لحاظ عدم قطعیت در توان تولیدی توربین بادی”، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۴، صفحه ۲۳۳-۲۴۵، زمستان ۱۳۹۵.
- [23] R. Mohammadi, H. A. Abyaneh, F. Razavi, M. Al-Dabbagh, and S. H. H. Sadeghi, “Optimal relays coordination efficient method in interconnected power systems,” *Electr. Eng. J.*, vol. 61, no. 2, pp. 75-83, 2010.
- [24] A. Mahari, and H. Seyedi “An analytic approach for optimal coordination of overcurrent relays,” *Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm. Distrib.*, vol. 7, no. 7, pp. 674-680, 2013.
- [25] A. A. Kida, L. A. Gallego, “A high-performance hybrid algorithm to solve the optimal coordination of overcurrent relays in radial distribution networks considering several curve shapes”, *Electr. Power Syst. Res.* vol. 140, pp. 464-472, 2016.
- [26] C. A. C. Salazar, A. C. Enriquez, S. E. Schaeffer, “Directional overcurrent relay coordination considering non-standardized time curves”, *Electr. Power Syst. Res.* vol. 122, pp. 42-49, 2015.
- [27] R. Mohammadi, H. A. Abyaneh, A. Agheli, and H. Rastegar, “Overcurrent relays coordination considering transient behaviour of fault current limiter and distributed generation in distribution power network,” *Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm. Distrib.*, vol. 5, no. 9, pp. 903-911, 2011.
- [28] IEEE Std. C37.112: “IEEE standard inverse-time characteristic equations for overcurrent relays”, 1996.
- [29] M. R. Dadash Zadeh, and Z. Zhang, “A new DFT-based current phasor estimation for numerical protective relaying,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 28, no. 4, pp. 2172 - 2179, 2013.
- [30] V. Farahani, S. H. H. Sadeghi, H. A. Abyaneh, and K. Mazlumi, “An improved reconfiguration method for maximum loss reduction using discrete genetic algorithm,” in *Proc. Int. Conf. Power Eng. and Optim. (PEOCO)*, pp. 178-183, 2010.
- [1] A. J. Urdaneta, H. Restrepo, S. Marquez, and J. Sanchez, “Coordination of directional overcurrent relay timing using linear programming,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 11, no. 1, pp. 122 - 129, 1996.
- [2] D. Birla, R. P. Maheshwari, and H. O. Gupta, “A new nonlinear directional overcurrent relay coordination technique, and banes and boons of near-end faults based approach,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 21, no. 3, pp. 1176 - 1182, 2006.
- [3] R. Correa, G. Cardoso Jr., O. C.B. de Araujo, L. Mariotto, “Online coordination of directional overcurrent relays using binary integer programming”, *Electr. Power Syst. Res.* vol. 127, pp. 118-125, 2015.
- [4] M. N. Alam, B. Das, V. Pant, “An interior point method based directional coordination scheme for directional overcurrent relays in meshed networks”, *Int. J. Electr. Power & Energy Syst.* vol. 81, pp. 153-164, 2016.
- [5] Z. Moravej, F. Adelnia, F. Abbasi, “Optimal coordination of directional overcurrent relays using NSGA-II”, *Electr. Power Syst. Res.* vol. 119, pp. 228-236, 2015.
- [6] F. A. Albasri, A. R. Alroomi, and J. H. Talaq, “Optimal coordination of directional overcurrent relays using biogeography-based optimization algorithms,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 30, no. 4, pp. 1810 - 1820, 2015.
- [7] M. Y. Shih, A. C. Enriquez, T. Hsiao, L. M. T. Trevino, “Enhanced differential evolution algorithm for coordination of directional overcurrent relays”, *Electr. Power Syst. Res.* vol. 143, pp. 365-375, 2017.
- [8] M. Y. Shih, C. A. C. Salazar, and A. C. Enriquez, “Adaptive directional overcurrent relay coordination using ant colony optimization,” *Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm. Distrib.*, vol. 9, no. 14, pp. 2040-2049, 2015.
- [9] S.S. Gokhale, V.S. Kale, “An application of a tent map initiated Chaotic Firefly algorithm for optimal overcurrent relay coordination”, *Int. J. Electr. Power & Energy Syst.* vol. 78, pp. 336-342, 2016.
- [10] T. Amraee, “Coordination of directional overcurrent relays using seeker algorithm,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, no. 3, pp. 1415 - 1422, 2012.
- [11] M. N. Alam, B. Das, V. Pant, “A comparative study of metaheuristic optimization approaches for directional overcurrent relays coordination”, *Electr. Power Syst. Res.* vol. 128, pp. 39-52, 2015.
- [12] R. Mohammadi, H. A. Abyaneh, S. S. H. Kamangar, and F. Razavi, “A new genetic algorithm method for optimal coordination of overcurrent and distance relays considering

زیرنویس‌ها

- ¹ Time Setting Multiplier
- ² Pickup Current
- ³ Fault Current Limiter
- ⁴ Distributed Generation
- ⁵ Critical Time Intervention
- ⁶ Relay Operation Status
- ⁷ Normal Inverse