یک شاخص جدید به‌منظور ارزیابی اثر منابع تولید پراکنده بر هماهنگی رله‌های اضافه جریان

عباس صابری نوقابی[۱]، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران – a.saberi@birjand.ac.ir

چکیده: حضور منابع تولید پراکنده (DG) در سیستم قدرت در مقابل مزایای اقتصادی آن، می‌تواند باعث ایجاد عدم هماهنگی در عملکرد رله‌های اضافه جریان گردد. در این مقاله شاخص جدیدی، مستقل از تنظیمات رله‌ها، به‌منظور تعیین میزان تأثیر نصب DG بر قیود هماهنگی رله‌های اضافه جریان ارائه گردیده است. در صورت حضور منابع تولید پراکنده در شبکه، جریان خطای عبوری از رله‌های پشتیبان و اصلی نسبت به حالت عدم حضور آن منابع تغییر می‌کند. بر این اساس شاخص پیشنهادی برای هر زوج رله به‌صورت تفاضل نرخ تغییرات جریان خطای عبوری از رله پشتیبان و نرخ تغییرات جریان خطای عبوری از رله اصلی تعریف گردیده است. با روابط ریاضی نشان داده شده است که در صورت نصب DG، برای هر قید هماهنگی علامت شاخص پیشنهادی نشان‌دهنده کاهش یا افزایش فاصله زمانی هماهنگی بوده و اندازه شاخص پیشنهادی نشان‌دهنده میزان کاهش فاصله زمانی هماهنگی بوده است. شاخص پیشنهادی برای قیود هماهنگی رله‌های اضافه جریان یک شبکه ۸ شینه به ازای نصب DG در شین‌های مختلف شبکه محاسبه گردیده است. نتایج درستی شاخص پیشنهادی در ارزیابی میزان تأثیر مکان نصب و ظرفیت DG بر قیود هماهنگی را نشان داده است. همچنین مکان‌های نصب و ظرفیت‌های DG به کمک این شاخص رتبه‌بندی گردیده است.

واژه‌های کلیدی: هماهنگی رله‌های اضافه جریان، منابع تولید پراکنده، شاخص پیشنهادی.

A New Index for Evaluating Distributed Generation Impacts on Overcurrent Relay Coordination

A. Saberi Noughabi, Assistant Professor[1]

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, a.saberi@birjand.ac.ir

Abstract: The presence of Distributed Generation (DG) resources in power system, versus economic benefits, can be cause a miss-coordination in operation of overcurrent relay. In this paper, a new index is proposed to determine the impact of DG installation on coordination constraints of overcurrent relay, independent of relay settings. In the presence of DG in network, the fault current passing through the backup and primary relays change in compare to the no presence of DG. According to this, the proposed index is defined as the difference between the rate of change of fault current passing through backup relay and the rate of change of fault current passing through primary relay, for each relay pairs. In the presence of DG, mathematically proven that the sign of the proposed index for each coordination constraints, indicates the increase or decrease of coordination time interval and the measure of proposed index indicates the reduction of coordination time interval. The proposed index for the coordination constraints of overcurrent relay of an 8-bus test system is determined at each DG location. The results have shown the correctness of proposed index to evaluate the impact of location and capacity of DG on the coordination constraints. Also, the locations and capacities of DG have been ranked base on proposed index.

Keywords: Overcurrent relay coordination, distributed generation, proposed index.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۶/۲
تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۴/۹/۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۳
نام نویسنده مسئول: عباس صابری نوقابی
نشانی نویسنده مسئول: ایران - بیرجند – دانشگاه بیرجند - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- گروه برق

۱- مقدمه

رله‌های اضافه جریان به‌عنوان حفاظت اصلی شبکه‌های توزیع و حفاظت پشتیبان شبکه‌های انتقال و فوق توزیع مورداستفاده قرار می‌گیرد. در شبکه‌هایی که جریان خطا در نقاط مختلف آن به ازای یک خطای مشابه تفاوت محسوسی داشته باشد، رله‌های اضافه جریان می‌تواند کاربرد مؤثر داشته باشد [۱]. مسئله هماهنگی بهینه رله‌های اضافه جریان عبارت است از تعیین تنظیم جریان و تنظیم زمان این رله‌ها به‌نحوی‌که کوچک‌ترین جزء سیستم که خطا در آن رخ‌داده در کم‌ترین زمان ممکن از شبکه جدا گردد. برای رسیدن به این منظور باید اولاً زمان عملکرد رله‌های اضافه جریان حداقل گردد و ثانیاً هیچ‌گونه عدم هماهنگی در عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان ایجاد نگردد [۲].

امروزه منابع تولید پراکنده[۱] (DG) به دلیل مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی بالای آن به‌طور گسترده در شبکه‌های توزیع کاربرد پیدا کرده است [۳، ۴]. اتصال این منابع به شبکه‌های توزیع یا فوق توزیع باعث تغییر سطح اتصال کوتاه شبکه گردیده و بر جریان اتصال کوتاه و نهایتاً زمان عملکرد رله‌های اضافه جریان تأثیرگذار است. تغییر زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان می‌تواند باعث ایجاد عدم هماهنگی در عملکرد رله‌های اضافه جریان گردد [۵].

میزان تأثیر DG بر مسئله هماهنگی به‌شدت به مکان و ظرفیت آن منابع وابسته است. در [۶] اثر DG اینورتری بر هماهنگی ریکلوزر-فیوز باهدف کاهش عملکرد بی‌مورد فیوز در شبکه توزیع بررسی گردیده است. شرایط مختلف خطا، مقاومت‌های مختلف خطا و مکان‌های مختلف DG در این مرجع در نظر گرفته شده است. در [۷] اثر کنترل‌کننده ولتاژ و جریان در منابع تولید پراکنده اینورتری در سیستم حفاظت صنعتی بررسی گردیده است. همچنین یک الگوریتم رله تطبیقی برای تشخیص خطا در حضور DG اینورتری با انواع کنترل‌کننده‌ها پیشنهاد گردیده است. حداکثر ظرفیت DG در [۸] برای یک شبکه شعاعی به نحوی تعیین گردیده که هماهنگی حفاظتی در حضور DG نیز برقرار بماند. نتایج نشان داده، روش پیشنهادی در این مرجع شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم را بهبود داده است. با توجه به این‌که حضور DG باعث عدم هماهنگی ریکلوزر/فیوز و افزایش فیوز سوزی در سیستم قدرت می‌گردد، در [۹] یک رله دیجیتال تطبیقی جدید بر اساس نسبت جریان فیدر به جریان ریکلوزر به‌منظور کاهش عدم هماهنگی پیشنهاد گردیده است. در [۱۰] یک روش کلا سه‌بندی برای کاهش عدم هماهنگی ریکلوزر/فیوز در حضور منابع تولید پراکنده ارائه گردیده است. در مرحله اول، بهترین مکان نصب DG به نحوی تعیین گردیده که کم‌ترین هماهنگی ایجاد گردد و در مرحله بعد تنظیمات ریکلوزر به نحوی تعیین گردیده که عدم هماهنگی حداقل گردد.

در [۱۱] یک روش برای ارزیابی اثر DG بر هماهنگی رله‌های اضافه جریان به کمک یک شاخص عدم هماهنگی حفاظتی[۲] (PMI) ارائه گردیده است. این شاخص احتمال وقوع عدم هماهنگی در سیستم حفاظتی را نشان می‌دهد. در این مقاله حداکثر ظرفیت قابل‌نصب DG به نحوی تعیین گردیده که احتمال وقوع عدم هماهنگی حداقل گردد. یک شاخص هماهنگی حفاظتی[۳] (PCI) برای طراحان سیستم توزیع در حضور DG در [۱۲] پیشنهاد گردیده است. این شاخص به‌صورت بهینه بر اساس نسبت تغییرات ظرفیت DG به تغییرات فاصله زمانی هماهنگی تعریف گردیده که میزان کاهش فاصله زمانی هماهنگی رله‌های اصلی/پشتیبان در اثر افزایش ظرفیت DG را نشان می‌دهد. یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی دومرحله‌ای برای تعیین مقدار بهینه شاخص PCI پیشنهاد گردیده است. در [۱۳] ابتدا اثر DG بر عملکرد سیستم حفاظتی شبکه توزیع بررسی گردیده سپس سه شاخص برای تعیین میزان ریسک سیستم حفاظتی براثر تغییر مکان و ظرفیت DG پیشنهاد و ارزیابی گردیده است. نتایج نشان داده درصورتی‌که DG بدون عملکرد جزیره‌ای باشد ریسک سیستم حفاظتی در صورت نصب DG افزایش خواهد یافت.

شاخص ارائه‌شده در [۱۳-۱۱] به تنظیمات رله‌های اضافه جریان وابسته است. در این مقاله به‌منظور تعیین میزان تأثیر مکان و ظرفیت DG بر قیود مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان شاخص جدیدی ارائه گردیده است. حضور منابع تولید پراکنده در شبکه، باعث تغییر جریان خطای عبوری از رله‌های پشتیبان و اصلی نسبت به حالت عدم حضور آن منابع می‌گردد. لذا تفاضل نرخ تغییرات جریان‌های اتصال کوتاه عبوری از رله پشتیبان و نرخ تغییرات جریان‌های اتصال کوتاه عبوری از رله اصلی به‌صورت یک شاخص جدید، مستقل از تنظیمات رله‌ها، تعریف شده است. با روابط ریاضی اثبات گردیده که این شاخص می‌تواند میزان کاهش یا افزایش فاصله زمانی هماهنگی را برای هر قید هماهنگی، در صورت نصب DG، تعیین نماید. به کمک شاخص پیشنهادی می‌توان بهترین مکان و ظرفیت DG را از دیدگاه مسئله هماهنگی تعیین نمود. همچنین زوج رله‌هایی که هماهنگی آن‌ها تأثیر بیشتری از نصب DG می‌پذیرند به کمک این شاخص قابل‌تشخیص است. با استفاده از یک شبکه نمونه ۸ شینه، درستی شاخص پیشنهادی در تعیین میزان تأثیر DG بر قیود هماهنگی نشان داده شده است.

۲- مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان

رله‌های اضافه جریان معکوس زمانی دارای دو ضریب تنظیم جریان و زمان است. در مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان، هدف تعیین تنظیم جریان و زمان رله‌ها به نحوی است که اولاً خطای ایجادشده در هر نقطه از شبکه در کم‌ترین زمان ممکن رفع گردد و ثانیاً تداخلی در عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان ایجاد نگردد. لذا در حالت کلی مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی مطابق رابطه (۱) تعریف می‌گردد.

$$\begin{aligned} &Min \quad J(X) \\ &s.t: \\ &\quad C_m(X) = t_j - t_i - CTI \geq 0 \\ &\quad \forall (i,j) \in \Omega \qquad m = 1,2,\ldots,n_{BP} \end{aligned} \tag{۱}$$

در این رابطه، بردار حالت X مجموعه متغیرهای بهینه سازی مسئله شامل تنظیمات جریان (I_P) و ضریب تنظیم زمانی (TDS) رله‌های موجود در شبکه بوده و Cm(X) قید هماهنگی برای mامین زوج رله اصلی/پشتیبان بوده درحالی‌که n_{BP} تعداد زوج رله‌های اصلی/پشتیبان است. t_i و t_j به ترتیب زمان عملکرد رله اصلی i و رله پشتیبان j بوده و زوج رله (i, j) به مجموعه زوج رله‌های اصلی/پشتیبان (Ω) تعلق دارد. CTI نیز حداقل فاصله زمانی هماهنگی موردنیاز برای جلوگیری از تداخل عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان است. J(.) تابع هدف در مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان است. معمولاً در بسیاری از مراجع این تابع، مجموع زمان عملکرد رله‌های اصلی به ازای خطا در جلوی آن رله‌ها در نظر گرفته شده است.

معادله مشخصه رله اضافه جریان، زمان عملکرد رله را به‌صورت تابعی از تنظیم جریان و ضریب تنظیم زمانی رله نمایش می‌دهد. معادلات متفاوتی برای مدل‌سازی منحنی مشخصه رله اضافه جریان پیشنهاد گردیده تا علاوه بر ساده بودن، نسبت به منحنی مشخصه واقعی رله خطای کم‌تری داشته باشد. در این مقاله مشخصه استاندارد IEC مطابق رابطه (۲) برای نمایش مشخصه رله‌های اضافه جریان استفاده گردیده است.

$$t_i = TDS_i \times f(M_i)$$
$$f(M_i) = \frac{k_1}{M_i^{k_2} - 1} \qquad M_i = \frac{I_i}{I_{p_i}} \tag{۲}$$

در این رابطه TDS_i و Ip_i به ترتیب ضریب تنظیم زمانی و تنظیم جریان رله iام، I_i جریان خطای عبوری از این رله و M_i نسبت جریان اتصال کوتاه عبوری از رله iام به جریان تنظیم آن رله است. ضرایب k_1 و k_2 نوع مشخصه رله اضافه جریان (کاهشی، بسیار کاهشی و شدیداً کاهشی) را نمایش می‌دهد.

تنظیم جریان رله‌های اضافه جریان بر اساس حداکثر جریان بار (I_{load}^{max}) و حداقل جریان خطا (I_{fault}^{min}) صورت می‌گیرد به‌نحوی‌که رله مطابق رابطه (۳) به ازای حداکثر جریان بار عملکرد نداشته و به ازای حداقل جریان خطا عملکرد داشته باشد.

$$I_{load}^{max} \le I_p \le I_{fault}^{min} \tag{۳}$$

معمولاً تنظیم جریان رله‌ها ۱/۲ تا ۱/۳ برابر I_{load}^{max} انتخاب می‌گردد [۱].

۳- اثر منابع تولید پراکنده بر قیود هماهنگی

کاربرد منابع تولید پراکنده به دلیل مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی، در شبکه توزیع و فوق توزیع در حال گسترش است. در برخی از منابع تولید پراکنده همچون نیروگاه‌های گازی کوچک یا برخی نیروگاه‌های بادی از ژنراتورهای سنکرون استفاده می‌گردد. راکتانس گذرای این ژنراتورها باعث می‌گردد در شرایط وقوع خطا علاوه بر جریان خطایی که از سمت شبکه تزریق می‌گردد، جریان خطایی نیز از محل ژنراتور سنکرون به محل خطا تزریق می‌گردد. اما با توجه به مکان رله‌های اصلی و پشتیبان، جریان‌های عبوری از رله‌های اصلی و پشتیبان به یک نسبت تغییر نخواهد کرد که همین امر می‌تواند باعث ایجاد عدم هماهنگی رله‌های اصلی و پشتیبان گردد. در ادامه با مقایسه قیود هماهنگی برای دو حالت با حضور DG و بدون حضور DG، معیاری برای تعیین میزان تأثیر حضور DG از دیدگاه مسئله هماهنگی ارائه خواهد گردید.

قید هماهنگی رابطه (۱) برای mامین زوج رله اصلی/پشتیبان (i, j)، در صورت عدم حضور DG مجدداً به‌صورت رابطه (۴) بازنویسی گردیده است.

$$\Delta t_m = t_j - t_i \ge CTI \tag{۴}$$

در این رابطه Δt_m فاصله زمانی هماهنگی بین mامین زوج رله اصلی/پشتیبان به ازای خطا در شین نزدیک رله است.

درصورتی‌که یک DG روی یک شین شبکه نصب گردد، جریان خطای عبوری از رله تغییر کرده و بالطبع زمان عملکرد رله، مطابق رابطه (۲) به دلیل وابستگی به جریان خطا تغییر خواهد کرد. درصورتی‌که زمان عملکرد رله اصلی و پشتیبان در حضور DG در شین k به ترتیب با t'_i و t'_j نشان داده شود، لذا داریم:

$$\Delta t'_m = t'_j - t'_i \tag{۵}$$

که $\Delta t'_m$ فاصله زمانی هماهنگی بین mامین زوج رله اصلی/پشتیبان به ازای خطا در شین نزدیک رله در صورت نصب DG در شین k است. برای این قید دو حالت می‌تواند رخ دهد:

حالت ۱: $\Delta t'_m > \Delta t_m$: در این صورت قید جدید نیز رعایت گردیده و لذا نصب DG در شین k بر قید mام تأثیری ندارد.

حالت ۲: $\Delta t'_m < \Delta t_m$: در این شرایط نصب DG در شین k بر قید mام تأثیرگذار بوده و ممکن است قید جدید رعایت نگردد. لازم به ذکر است هرچه $\Delta t'_m$ کوچک‌تر باشد می‌توان نتیجه گرفت که نصب DG اثر بیش‌تری بر آن قید داشته است. لذا می‌توان از آن برای انتخاب یک معیار برای تعیین میزان تأثیرگذاری DG بر قیود هماهنگی استفاده نمود.

اما t'_i و t'_j و متناظر با آن $\Delta t'_m$ به ضرایب تنظیم زمان رله‌های اصلی و پشتیبان وابسته بوده لذا تعیین میزان تأثیرگذاری آن به تنظیمات زمان رله‌ها وابسته بوده که مطلوب نیست. در ادامه شاخصی ارائه گردیده که مستقل از تنظیمات زمان رله‌ها میزان تأثیر حضور DG بر قیود هماهنگی را به‌صورت یک عدد نشان دهد.

۴- ارائه شاخص پیشنهادی

فاصله زمانی هماهنگی بین رله پشتیبان و رله اصلی مطابق روابط (۴) و (۵) می‌تواند معیار مناسبی برای تعیین میزان تأثیر نصب DG بر قیود هماهنگی باشد؛ اما محاسبه زمان عملکرد رله به ضریب تنظیم زمانی آن وابسته بوده که بدون حل مسئله هماهنگی معلوم نیست. لذا در این بخش به کمک روابط ریاضی یک شاخص، مستقل از ضریب تنظیم زمانی رله‌ها، متناسب با فاصله زمانی هماهنگی رله‌های اصلی/پشتیبان

ارائه گردیده است. شاخص پیشنهادی اثر نصب DG بر قید هماهنگی را به‌صورت یک ضریب عددی نشان می‌دهد.

برای این منظور تفاضل فاصله زمانی هماهنگی زوج رله اصلی پشتیبان (i,j) برای دو حالت با DG ($\Delta t'_m$) و بدون DG (Δt_m) مطابق رابطه (۶) تعریف و ساده‌سازی گردیده است.

$$\begin{aligned}\Delta t'_m - \Delta t_m &= t'_j - t'_i - (t_j - t_i) = t_j\left(\frac{t'_j}{t_j} - 1\right) - t_i\left(\frac{t'_i}{t_i} - 1\right)\\ &= t_j\left(\frac{TDS_j f(M'_j)}{TDS_j f(M_j)} - 1\right) - t_i\left(\frac{TDS_i f(M'_i)}{TDS_i f(M_i)} - 1\right)\\ &= t_j\left(\frac{f(M'_j) - f(M_j)}{f(M_j)}\right) - t_i\left(\frac{f(M'_i) - f(M_i)}{f(M_i)}\right)\end{aligned} \quad (۶)$$

توابع $\Delta F(I_B)$ و $\Delta F(I_P)$ مستقل از ضریب تنظیم زمان رله‌ها به‌صورت رابطه (۷) تعریف گردیده است.

$$\begin{aligned}\Delta F(I_B) &\equiv \frac{f(M_j) - f(M'_j)}{f(M_j)}\\ \Delta F(I_P) &\equiv \frac{f(M_i) - f(M'_i)}{f(M_i)}\end{aligned} \quad (۷)$$

لذا رابطه (۶) به‌صورت رابطه زیر قابل بازنویسی است:

$$\Delta t'_m - \Delta t_m = -t_j \Delta F(I_B) + t_i \Delta F(I_P) \quad (۸)$$

در ادامه فرض گردیده، در حالت عدم حضور DG هماهنگی کامل در شبکه برقرار است. لذا داریم:

$$\Delta t_m = t_j - t_i \geq CTI \quad \Rightarrow \quad t_j \geq t_i \quad (۹)$$

در این شرایط سه حالت برای رابطه (۸) قابل‌تصور است:

حالت الف- $\Delta F(I_B) \leq 0$ و $\Delta F(I_B) \leq \Delta F(I_P)$، در این حالت داریم:

$$\left\{\begin{array}{c} -\Delta F(I_B) \geq -\Delta F(I_P) \\ -\Delta F(I_B) \geq 0 \\ t_j > t_i \end{array}\right\} \Rightarrow -t_j \Delta F(I_B) \geq -t_i \Delta F(I_P) \quad (۱۰)$$
$$\Rightarrow \Delta t'_m - \Delta t_m \geq 0 \Rightarrow \Delta t'_m \geq \Delta t_m \geq CTI$$

بنابراین نصب DG در این حالت باعث افزایش فاصله زمانی هماهنگی نسبت به حالت بدون DG است. لذا عدم هماهنگی رخ نداده و نصب DG هیچ تأثیری بر قید هماهنگی نداشته است. بنابراین میزان تأثیر DG بر این قید هماهنگی صفر بوده و شاخص پیشنهادی را در این حالت می‌توان صفر در نظر گرفت.

حالت ب- $\Delta F(I_B) > 0$ و $\Delta F(I_B) \geq \Delta F(I_P)$، در این حالت داریم:

$$\left\{\begin{array}{c} \Delta F(I_B) \geq \Delta F(I_P) \\ \Delta F(I_B) > 0 \\ t_j > t_i \end{array}\right\} \Rightarrow t_j \Delta F(I_B) \geq t_i \Delta F(I_P) \quad (۱۱)$$
$$\Rightarrow \Delta t'_m - \Delta t_m \leq 0 \Rightarrow \Delta t'_m \leq \Delta t_m$$

در این حالت فاصله زمانی هماهنگی بین رله‌های اصلی و پشتیبان کاهش یافته و احتمال نقض قید در این شرایط وجود دارد. هرچقدر تفاضل $\Delta F(I_B) - \Delta F(I_P)$ بزرگ‌تر باشد، احتمال ایجاد عدم هماهنگی نیز افزایش می‌یابد. بنابراین در این حالت نصب DG بر قید هماهنگی تأثیرگذار بوده و میزان تأثیرگذاری نصب DG بر قید هماهنگی را می‌توان با تفاضل $\Delta F(I_B) - \Delta F(I_P)$ نشان داد. لذا شاخص پیشنهادی می‌تواند به‌صورت تفاضل $\Delta F(I_B) - \Delta F(I_P)$ تعریف گردد. بدیهی است هر چه این تفاضل بزرگ‌تر باشد، فاصله زمانی هماهنگی پس از نصب DG کوچک‌تر شده و احتمال عدم هماهنگی افزایش خواهد یافت.

حالت ج- $\Delta F(I_B) > \Delta F(I_P)$ و $\Delta F(I_B) < 0$ یا $\Delta F(I_B) < \Delta F(I_P)$ و $\Delta F(I_B) > 0$:

در این حالت Δt_m و $\Delta t'_m$ رابطه واضحی نسبت به همدیگر ندارند. به‌عبارت‌دیگر ممکن است $\Delta t'_m < \Delta t_m$ و یا $\Delta t'_m > \Delta t_m$ باشد. البته لازم به ذکر است با توجه به اینکه به ازای خطا در جلوی رله اصلی، جریان خطای عبوری از رله پشتیبان است، در نتایج عددی نشان داده شده است که در شبکه‌های نمونه این حالت هیچگاه رخ نداده است.

بنابراین با توجه به توضیحاتی که در مورد میزان تأثیرگذاری نصب DG بر قید هماهنگی، در بالا ارائه گردید، شاخص رابطه (۱۲) به‌منظور تعیین میزان حساسیت قید هماهنگی mام به نصب DG در شین kام پیشنهاد گردیده است.

$$\left\{\begin{array}{l} PI_m^{(k)} = \Delta F(I_B) - \Delta F(I_P) \\ \quad if \ \ \Delta F(I_B) \geq \Delta F(I_P) \ \ , \ \ \Delta F(I_B) > 0 \\ PI_m^{(k)} = 0 \\ \quad if \ \ \Delta F(I_B) \leq \Delta F(I_P) \ \ , \ \ \Delta F(I_B) < 0 \end{array}\right\} \quad (۱۲)$$

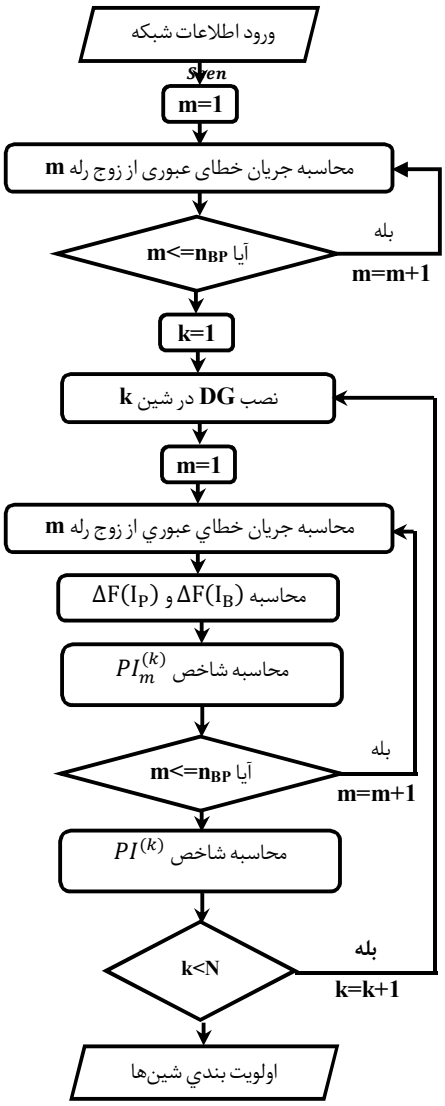
به‌عبارت‌دیگر، شاخص $PI_m^{(k)}$ میزان تأثیر نصب DG در شین k بر قید هماهنگی m را نشان می‌دهد. مزیت عمده این شاخص این است که به تنظیم زمان رله‌ها وابسته نیست و بدون حل مسئله هماهنگی می‌توان میزان حساسیت یك قید هماهنگی به نصب DG را تعیین نمود. در بخش نتایج عددی نشان داده شده که اندازه شاخص پیشنهادی به‌درستی متناسب با اندازه تفاضل $\Delta t_m - \Delta t'_m$ است.

۵- اثر منابع تولید پراکنده بر کل مسئله هماهنگی

در بخش قبل شاخص $PI_m^{(k)}$ به‌منظور تعیین میزان تأثیر نصب DG در شین k بر mامین قید هماهنگی ارائه گردید. میزان تأثیر نصب DG در شین k بر کل قیود مسئله هماهنگی مطابق رابطه (۱۳) تعریف گردیده است.

$$PI^{(k)} = \sum_{m=1}^{n_{BP}} PI_m^{(k)} \quad (۱۳)$$

در این رابطه شاخص $PI^{(k)}$ میزان تأثیر نصب DG در شین k بر کل قیود مسئله هماهنگی را نشان می‌دهد. برای محاسبه این شاخص الگوریتم شکل ۱ پیشنهاد گردیده است.



شکل ۱: الگوریتم محاسبه شاخص پیشنهادی

مطابق این الگوریتم ابتدا در حالت بدون DG محاسبات اتصال کوتاه انجام شده و جریان‌های خطای عبوری از رله‌های اضافه جریان برای هر زوج رله محاسبه گردیده است. سپس DG در شین شماره k نصب شده و مجدداً محاسبات اتصال کوتاه انجام شده و جریان خطای عبوری از زوج رله‌های اصلی/پشتیبان محاسبه گردیده است. با معلوم بودن جریان خطای عبوری از رله‌ها در حالت بدون DG و حالت با حضور DG، مقادیر $\Delta F(I_B)$ و $\Delta F(I_P)$ و نهایتاً شاخص $PI_m^{(k)}$ مطابق رابطه (۱۲) برای هر زوج رله محاسبه گردیده است. این فرآیند برای تمامی زوج رله‌ها تکرار گردیده تا شاخص $PI^{(k)}$ مطابق رابطه (۱۳) به ازای نصب DG در شین k به دست آید. این مراحل برای تمامی شین‌ها تکرار گردیده و شاخص پیشنهادی برای تمامی شین‌های شبکه محاسبه گردیده است.

هرچه این شاخص برای یک شین بزرگ‌تر باشد، نصب DG در آن شین تأثیر بیش‌تری بر مسئله هماهنگی خواهد داشت. لذا درنهایت از این شین‌های شبکه به کمک این شاخص بر اساس میزان تأثیرگذاری بر مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان اولویت‌بندی گردیده است.

همچنین با تغییر ظرفیت DG می‌توان مجدداً شاخص رابطه (۱۳) را برای هر شین محاسبه نمود تا اثر تغییر ظرفیت DG نیز بر مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان برای هر شین محاسبه گردد.

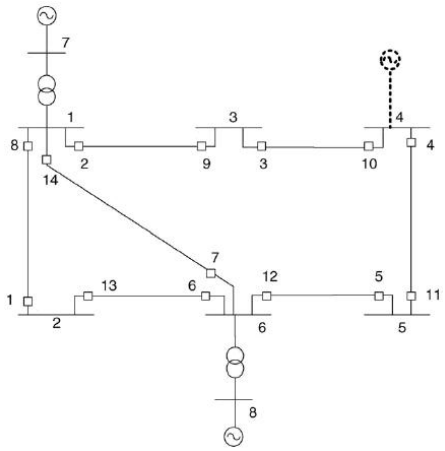
علاوه‌براین، زوج رله‌های اصلی/پشتیبان که تأثیرپذیری بیش‌تری از نصب DG در شین‌های مختلف شبکه را دارند به کمک شاخص پیشنهادی قابل‌محاسبه است. برای این منظور شاخص رابطه (۱۴) تعریف گردیده است.

$$PI_m = \sum_{k=1}^{n_Bus} PI_m^{(k)} \qquad (۱۴)$$

در این رابطه n_Bus تعداد شین‌های شبکه و شاخص PI_m میزان تأثیر نصب DG در شبکه بر mامین قید هماهنگی را نشان می‌دهد. این شاخص می‌تواند نقاط حساس شبکه از دیدگاه حفاظت اضافه جریان در صورت نصب DG را مشخص کند تا در صورت امکان در آن نقاط حفاظت‌های تکمیلی استفاده گردد.

۶- نتایج عددی

در این مقاله شبکه نمونه ۸ شینه به کمک شاخص‌های پیشنهادی مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته است. دیاگرام تک‌خطی شبکه به همراه مکان و شماره رله‌های اضافه جریان در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲: دیاگرام تک‌خطی شبکه ۸ شینه

اطلاعات این شبکه شامل امپدانس خطوط، بار شین‌ها و تولید ژنراتورها در [۱۴] آورده شده است. تمامی رله‌های اضافه جریان از نوع معکوس معمولی با مشخصه IEC در نظر گرفته شده و CTI برابر ۰/۳ ثانیه انتخاب گردیده است.

در این مقاله یک منبع تولید پراکنده از نوع ژنراتور سنکرون با ظرفیت ۵ مگاوات و ۱۲ کیلوولت در نظر گرفته شده که توسط یک ترانسفورماتور به شبکه متصل می‌گردد. راکتانس گذرای ۰/۲ پریونیت در مبنای ظرفیت آن برای مجموع ترانسفورماتور و منبع تولید پراکنده در نظر گرفته شده است.

تنظیمات جریان این شبکه با توجه به حداکثر جریان بار و حداقل جریان خطا و تنظیم موجود بر روی رله در جدول ۱ آورده شده است[۱۴].

۶-۱- ارزیابی شاخص پیشنهادی

در ابتدا حالت‌های ۱، ۲ و ۳ در بخش ۴ برای این شبکه نمونه مورد ارزیابی قرار گرفته تا صحت شاخص پیشنهادی از دیدگاه میزان تأثیر نصب DG بر قیود هماهنگی نشان داده شود. برای رسیدن به این منظور مراحل زیر دنبال گردیده است:

مرحله ۱: مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان در حالت عدم حضور DG حل گردیده است. برای این منظور با معلوم بودن تنظیمات جریان رله‌ها مسئله هماهنگی رابطه (۱) به یک مسئله برنامه‌ریزی خطی تبدیل گردیده [۱۴] و به کمک نرم‌افزار مطلب حل شده است. در این مقاله تنها خطای جلوی رله در نظر گرفته شده است. ضرایب تنظیم زمان بهینه رله‌ها در ستون سوم جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: تنظیمات بهینه رله‌های اضافه جریان در حالت عدم حضور **DG**

شماره رله	تنظیم جریان(A)	ضریب تنظیم زمان(TMS)
۱	۲۴۰	۰/۴۷۶۶
۲	۶۰۰	۰/۵۷۵۱
۳	۴۰۰	۰/۵۱۶۲
۴	۶۰۰	۰/۳۸۸۷
۵	۳۶۰	۰/۳۶۸۵
۶	۶۰۰	۰/۴۵۲۲
۷	۲۴۰	۰/۷۰۰۳
۸	۶۰۰	۰/۳۹۱۶
۹	۳۲۰	۰/۳۹۳۶
۱۰	۶۰۰	۰/۳۹۴۷
۱۱	۶۰۰	۰/۴۰۵۲
۱۲	۶۰۰	۰/۵۶۷۱
۱۳	۳۶۰	۰/۳۳۲۱
۱۴	۲۴۰	۰/۶۹۱۱

مرحله ۲: با توجه به تنظیمات اشاره‌شده در جدول ۱، Δt برای تک‌به‌تک قیود در حالت بدون DG محاسبه گردیده و در جدول ۲ آورده شده است.

مرحله ۳: با نصب DG با ظرفیت نامی در شین ۵، جریان‌های خطا محاسبه گردیده و به کمک این جریان‌های خطا و تنظیمات زمان موجود در جدول ۱، (تنظیمات به‌دست‌آمده از حل مسئله هماهنگی در حالت بدون DG) $\Delta t'$ محاسبه گردیده و در ستون پنجم جدول ۲ آورده شده است. در این ستون قیودی که با اضافه شدن DG مقدار $\Delta t'$ برای آن قیود کاهش یافته است، به‌صورت زیرخط و پررنگ نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد با نصب DG در شین ۵، اندازه $\Delta t'$ برای قیود ۵، ۱۶ و ۱۹ افزایش یافته (به‌عبارت‌دیگر نصب DG بر این قیود تأثیر نداشته است)، اما اندازه $\Delta t'$ برای سایر قیود کاهش یافته است (یعنی نصب DG تأثیر داشته است) که البته برخی از این قیود نقض نیز گردیده‌اند. همچنین در ستون آخر جدول ۲ تفاضل $\Delta t-\Delta t'$ آورده شده است. مشاهده می‌گردد برای تمامی قیود به‌جز قیود ۵، ۱۶ و ۱۹ فاصله زمانی هماهنگی کاهش یافته است.

جدول ۲: فاصله زمانی بین زمان عملکرد رله اصلی و پشتیبان در حالت بدون **DG** و حالت با حضور **DG** در شین ۵

شماره قید	شماره رله پشتیبان	شماره رله اصلی	Δt	$\Delta t'$	$\Delta t-\Delta t'$
۱	۱	۲	۰/۳۰۰۰	۰/۲۸۹۸	۰/۰۱۰۲
۲	۱	۱۴	۰/۴۰۰۳	۰/۳۸۹۲	۰/۰۱۱۱
۳	۲	۳	۰/۳۰۰۰	۰/۲۹۸۴	۰/۰۰۱۶
۴	۳	۴	۰/۳۰۰۰	۰/۲۹۸۰	۰/۰۰۲۰
۵	۴	۵	۰/۳۰۰۰	۰/۳۱۳۷	-۰/۰۱۳۷
۶	۵	۶	۰/۳۹۶۸	۰/۳۵۲۹	۰/۰۴۳۹
۷	۵	۷	۰/۳۰۰۰	۰/۲۵۵۹	۰/۰۴۴۱
۸	۶	۱	۰/۳۰۰۰	۰/۲۹۶۳	۰/۰۰۳۷
۹	۷	۲	۰/۳۰۰۰	۰/۲۹۳۷	۰/۰۰۶۳
۱۰	۷	۸	۰/۵۷۵۱	۰/۵۶۹۵	۰/۰۰۵۶
۱۱	۸	۱۳	۰/۳۰۰۰	۰/۲۹۷۹	۰/۰۰۲۱
۱۲	۹	۸	۰/۴۷۴۸	۰/۴۵۸۶	۰/۰۱۶۲
۱۳	۹	۱۴	۰/۳۰۰۰	۰/۲۸۳۵	۰/۰۱۶۵
۱۴	۱۰	۹	۰/۳۰۰۰	۰/۲۹۴۵	۰/۰۰۵۵
۱۵	۱۱	۱۰	۰/۳۰۰۰	۰/۲۸۶۹	۰/۰۱۳۱
۱۶	۱۲	۱۱	۰/۳۰۰۰	۰/۳۱۰۸	-۰/۰۱۰۸
۱۷	۱۳	۷	۰/۳۸۱۶	۰/۳۸۰۵	۰/۰۰۱۱
۱۸	۱۳	۱۲	۰/۳۰۰۰	۰/۲۹۴۱	۰/۰۰۵۹
۱۹	۱۴	۶	۰/۴۷۸۴	۰/۴۷۹۲	-۰/۰۰۰۸
۲۰	۱۴	۱۲	۰/۳۰۰۰	۰/۲۹۷۹	۰/۰۰۲۱

مرحله ۴: در این مرحله $\Delta F(I_B)$ ، $\Delta F(I_B) - \Delta F(I_P)$ و $PI_m^{(k)}$ مستقل از تنظیمات زمان رله‌های اضافه جریان موجود در جدول ۱، برای تک‌به‌تک قیود در صورت نصب DG در شین ۵ محاسبه گردیده و در جدول ۳ آورده شده است. در ستون‌های انتهایی این جدول برای هر یک از قیود، به کمک علامت $\Delta F(I_B)$ و علامت $\Delta F(I_B) - \Delta F(I_P)$ ، حالت‌های الف، ب و ج که در بخش ۳ اشاره شد، تعیین گردیده است.

مرحله ۵: در این مرحله به‌منظور بررسی صحت شاخص پیشنهادی، نتایج جداول ۲ و ۳، با یکدیگر مقایسه گردیده است:

۱- حالت ج $\Delta F(I_B) - \Delta F(I_P) > 0$ و $\Delta F(I_B) < 0$ یا $\Delta F(I_B) - \Delta F(I_P) < 0$ و $\Delta F(I_B) >$ که در بخش ۳ توضیح داده شد، با نصب DG در شین ۵ رخ نداده است. بررسی نتایج نصب DG در سایر شین‌ها نیز نشان داد که حالت ج هیچگاه رخ نمی‌دهد.

۲- قیود شماره ۵، ۱۶ و ۱۹ که شاخص $PI_m^{(k)}$ برای این قیود مطابق جدول ۳ صفر است (حالت الف)، مطابق جدول ۲، $\Delta t'$ نیز برای این قیود بزرگ‌تر از Δt بوده است. یعنی نصب DG در شین ۵ باعث افزایش فاصله زمانی هماهنگی گردیده و لذا بر قید هماهنگی تأثیر ندارد. بنابراین به

کمک شاخص $PI_m^{(k)}$ مستقل از تنظیمات رله‌ها قیودی که براثر نصب DG تأثیر نمی‌پذیرند، تشخیص داده شده است.

۳- برای سایر قیود (به‌جز قیود شماره ۵، ۱۶ و ۱۹) شاخص $PI_m^{(k)}$ مطابق جدول ۳ بزرگ‌تر از صفر است (حالت ب). مطابق جدول ۲ نیز برای این قیود $\Delta t'$ کوچک‌تر از Δt بوده است. یعنی نصب DG در شین ۵ باعث کاهش فاصله زمانی هماهنگی گردیده است. البته کاهش فاصله زمانی برای برخی قیود باعث ایجاد عدم هماهنگی نیز گردیده است. بنابراین به کمک شاخص $PI_m^{(k)}$ مستقل از تنظیمات رله‌ها قیودی که براثر نصب DG تأثیر می‌پذیرند، تشخیص داده شده است.

جدول ۳: حالت‌های ایجادشده براثر نصب **DG** در شین ۵ به همراه شاخص $PI_m^{(k)}$

حالت ج	حالت ب	حالت الف	$PI_m^{(k)}$	ΔF(IB)-ΔF(IP)	ΔF(IB)	شماره رله اصلی	شماره رله پشتیبان	شماره قید
	بله		۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۸۱	۰/۰۱۱۷	۲	۱	۱
	بله		۰/۰۰۸۸	۰/۰۰۸۸	۰/۰۱۱۷	۱۴	۱	۲
	بله		۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۳۹	۳	۲	۳
	بله		۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۳۳	۴	۳	۴
		بله	۰	-۰/۰۲۱	۰/۰۰۰۰	۵	۴	۵
	بله		۰/۰۳۹۷	۰/۰۳۹۷	۰/۰۴۵۵	۶	۵	۶
	بله		۰/۰۴۰۶	۰/۰۴۰۶	۰/۰۴۵۵	۷	۵	۷
	بله		۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۷۰	۱	۶	۸
	بله		۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۸۲	۲	۷	۹
	بله		۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۸۲	۸	۷	۱۰
	بله		۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۵۱	۱۳	۸	۱۱
	بله		۰/۰۱۳۵	۰/۰۱۳۵	۰/۰۱۷۷	۸	۹	۱۲
	بله		۰/۰۱۴۹	۰/۰۱۴۹	۰/۰۱۷۷	۱۴	۹	۱۳
	بله		۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۱۱۲	۹	۱۰	۱۴
	بله		۰/۰۱۰۵	۰/۰۱۰۵	۰/۰۱۹۱	۱۰	۱۱	۱۵
		بله	۰	-۰/۰۱۴	۰/۰۰۰۰	۱۱	۱۲	۱۶
	بله		۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۵۴	۷	۱۳	۱۷
	بله		۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۵۴	۱۲	۱۳	۱۸
	بله	بله	۰	-۰/۰۰۳	-۰/۰۰۳	۶	۱۴	۱۹
	بله		۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۲۷	۱۲	۱۴	۲۰

۴- اندازه شاخص $PI_m^{(k)}$ میزان تأثیر نصب DG بر قید هماهنگی را نشان می‌دهد. برای یک قید هماهنگی هر چه شاخص $PI_m^{(k)}$ بزرگ‌تر باشد به همان نسبت تفاضل $\Delta t-\Delta t'$ نیز بیش‌تر خواهد بود یعنی فاصله زمانی هماهنگی کاهش بیش‌تر داشته و یا به تعبیری نصب DG بر آن قید تأثیر بیش‌تری داشته است. برای نشان دادن این موضوع در جدول ۴ قیود هماهنگی بر اساس شاخص $PI_m^{(k)}$ به‌صورت نزولی مرتب گردیده‌اند. همچنین در این جدول تفاضل $\Delta t-\Delta t'$ نیز برای هر قید آورده شده است.

مشاهده می‌گردد قیود بر اساس تفاضل $\Delta t-\Delta t'$ نیز به صورت نزولی مرتب گردیده است. به‌عبارت‌دیگر قیودی که دارای شاخص $PI_m^{(k)}$ بزرگ‌تری هستند، تفاضل $\Delta t-\Delta t'$ نیز برای این قیود بیش‌تر است. به‌عنوان نمونه قید شماره ۷ دارای بیش‌ترین شاخص $PI_m^{(k)}$ بوده که مقدار تفاضل $\Delta t-\Delta t'$ نیز برای این قید بیش‌ترین بوده است. همچنین قیود ۵، ۱۶ و ۱۹ تأثیری نمی‌پذیرند که شاخص برای این قیود صفر است. علاوه بر این قید شماره ۱۷ کم‌ترین تأثیر را از نصب DG در شین ۵ پذیرفته است. البته در قیود ۲۰ و ۱۱ یک استثناء دیده می شود که با توجه به اعداد جدول بسیار ناچیز است. بنابراین به کمک شاخص $PI_m^{(k)}$ مستقل از تنظیمات رله‌ها می‌توان میزان تأثیر نصب DG بر قیود هماهنگی را تعیین نمود که به‌وضوح در جدول ۴ مشاهده گردید.

جدول ۴: رتبه‌بندی قیود بر اساس شاخص $PI_m^{(k)}$ در صورت نصب **DG** در شین ۵

$\Delta t-\Delta t'$	$PI_m^{(k)}$	شماره قید
۰/۰۴۴۱	۰/۰۴۰۶	۷
۰/۰۴۳۹	۰/۰۳۹۷	۶
۰/۰۱۶۵	۰/۰۱۴۹	۱۳
۰/۰۱۶۲	۰/۰۱۳۵	۱۲
۰/۰۱۳۱	۰/۰۱۰۵	۱۵
۰/۰۱۱۱	۰/۰۰۸۸	۲
۰/۰۱۰۲	۰/۰۰۸۱	۱
۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۴۶	۹
۰/۰۰۵۹	۰/۰۰۴۲	۱۸
۰/۰۰۵۶	۰/۰۰۳۹	۱۰
۰/۰۰۵۵	۰/۰۰۳۳	۱۴
۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۲۴	۸
۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۱۵	۴
۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۱۵	۲۰
۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۱۲	۱۱
۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۰۷	۳
۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۰۶	۱۷
-۰/۰۱۳۷	۰	۵
-۰/۰۱۰۸	۰	۱۶
-۰/۰۰۰۸	۰	۱۹

۶-۲- اثر مکان نصب **DG**

نتایج بخش قبل نشان داد شاخص $PI_m^{(k)}$ به‌خوبی میزان حساسیت قید در مقابل نصب DG را نمایش می‌دهد. نصب DG در سایر شین‌های شبکه ۸ شینه نیز بررسی گردیده و نتایج مشابهی حاصل گردیده است. در این بخش اثر مکان‌های مختلف نصب DG بر قیود مسئله هماهنگی بررسی گردیده است. برای این منظور در جدول ۵ شاخص $PI_m^{(k)}$ به ازای نصب DG در تک‌به‌تک شین‌ها برای قیود مسئله هماهنگی آورده شده است.

جدول ۵: شاخص $PI_m^{(k)}$ به ازای نصب **DG** در تک‌به‌تک شین‌ها

شماره قید	شماره رله پشتیبان	شماره رله اصلی	شماره شین نصب DG ۱	۲	۳	۴	۵	۶	PI_m
۱	۱	۲	۰/۰۰۰۰	۰/۰۳۱۷	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۸۱	۰/۰۱۱۰	۰/۰۵۸۸
۲	۱	۱۴	۰/۰۰۰۰	۰/۰۳۳۷	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۴۰	۰/۰۰۸۸	۰/۰۱۳۸	۰/۰۶۰۳
۳	۲	۳	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۴۵
۴	۳	۴	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۷۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۲۵	۰/۰۱۷۸
۵	۴	۵	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۹	۰/۰۱۱۶
۶	۵	۶	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۱۸	۰/۰۱۵۴	۰/۰۲۲۵	۰/۰۳۹۷	۰/۰۰۰۰	۰/۰۸۶۱
۷	۵	۷	۰/۰۰۵۴	۰/۰۰۰۰	۰/۰۱۶۸	۰/۰۲۶۶	۰/۰۴۰۶	۰/۰۰۰۰	۰/۰۸۹۴
۸	۶	۱	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۲۹	۰/۰۱۰۳
۹	۷	۲	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۶۲	۰/۰۱۵۶
۱۰	۷	۸	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۷۳	۰/۰۱۶۰
۱۱	۸	۱۳	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۷۳
۱۲	۹	۸	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۱۸	۰/۰۳۶۵	۰/۰۲۳۱	۰/۰۱۳۵	۰/۰۰۳۳	۰/۰۷۸۲
۱۳	۹	۱۴	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۳۷۴	۰/۰۲۴۲	۰/۰۱۴۹	۰/۰۰۵۰	۰/۰۸۱۶
۱۴	۱۰	۹	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۵۰	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۱۸	۰/۰۱۲۷
۱۵	۱۱	۱۰	۰/۰۰۴۰	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۰۰	۰/۰۱۰۵	۰/۰۰۵۸	۰/۰۲۷۴
۱۶	۱۲	۱۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰
۱۷	۱۳	۷	۰/۰۲۰۲	۰/۰۵۱۵	۰/۰۱۳۰	۰/۰۰۶۵	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰	۰/۰۹۱۹
۱۸	۱۳	۱۲	۰/۰۱۷۴	۰/۰۴۹۶	۰/۰۱۲۴	۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۰۰	۰/۰۹۱۴
۱۹	۱۴	۶	۰/۰۰۷۴	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۱۵۴
۲۰	۱۴	۱۲	۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰	۰/۰۱۵۲
$PI^{(k)}$			۰/۰۷۵۶	۰/۱۹۰۱	۰/۱۶۰۱	۰/۱۴۳۲	۰/۱۶۰۰	۰/۰۶۲۴	

در ستون آخر این جدول شاخص PI_m برای هر قید به ازای نصب DG در تمامی شین‌های شبکه آورده شده است. بر اساس این نتایج قید ۱۷، که رله ۱۳ پشتیبان رله ۷ است، به ازای نصب DG در اکثر شین‌ها فعال گردیده و بیش‌ترین تأثیر را از نصب DG متحمل می‌گردد. قیود ۱۸، ۶ و ۷ نیز وضعیت مشابهی دارند. با نگاهی به شبکه مشاهده می‌گردد، این زوج رله‌ها پشتیبان رله‌های ۶، ۷ و ۱۲ بوده که همگی روی شین ۶ نصب گردیده‌اند. بنابراین رله‌های خطوط متصل به شین ۶ بیش‌ترین تأثیر را از نصب DG در این شبکه می‌پذیرد.

در سطر آخر جدول ۵، شاخص $PI^{(k)}$ به ازای نصب DG در هر شین آورده شده است. این شاخص میزان تأثیر نصب DG در هر شین را بر کل قیود مسئله هماهنگی نشان می‌دهد. بر این اساس می‌توان شین‌های شبکه نمونه را رتبه‌بندی نمود. برای این منظور شاخص $PI^{(k)}$ به‌صورت نزولی مرتب گردیده و در جدول ۶ به همراه مکان نصب DG آورده شده است.

جدول ۶: رتبه‌بندی شین‌ها بر اساس شاخص $PI^{(k)}$

شماره شین	$PI^{(k)}$
۲	۰/۱۹۰۱
۳	۰/۱۶۰۱
۵	۰/۱۶۰۰
۴	۰/۱۴۳۲
۱	۰/۰۷۵۶
۶	۰/۰۶۲۴

مطابق جدول ۶ شین ۲ بدترین مکان برای نصب DG از دیدگاه هماهنگی رله‌های اضافه جریان است. همچنین اگر DG در شین ۶ نصب گردد کم‌ترین تأثیر را بر مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان خواهد داشت. با توجه به اندازه شاخص $PI^{(k)}$ در جدول ۶، نصب DG در شین‌های ۳ و ۵ تأثیر تقریباً یکسانی بر مسئله هماهنگی داشته است. در دیاگرام تک‌خطی شبکه نیز مشخص است که وضعیت شین ۳ و ۵ مشابه یکدیگر است. علاوه بر این شین‌های ۱ و ۶ نیز به‌عنوان مکان نصب DG تأثیر مشابهی بر هماهنگی رله‌های اضافه جریان دارند.

۶-۳- اثر ظرفیت‌های مختلف DG

در این بخش سه منبع تولید پراکنده با ظرفیت های ۲/۵، ۵ و ۱۰ مگاوات با همان امپدانس گذرای پریونیت ۰/۲ در مبنای ظرفیت خودشان در نظر گرفته شده است. هر یک از این منابع در شین‌های مختلف شبکه نصب گردیده و شاخص $PI_m^{(k)}$ برای هر یک از قیود هماهنگی محاسبه گردیده است. همچنین شاخص $PI^{(k)}$ به ازای نصب DG در هر شین شبکه برای هر سه ظرفیت محاسبه گردیده و در جدول ۷ آورده شده است.

با توجه به نتایج جدول ۷، با افزایش ظرفیت DG شاخص $PI^{(k)}$ افزایش یافته یعنی DG بزرگ‌تر تأثیر بیش‌تری بر هماهنگی رله های اضافه جریان داشته و می‌تواند باعث ایجاد عدم هماهنگی‌های بیش‌تری گردد. همچنین با افزایش ظرفیت DG اولویت‌بندی شین‌ها برای نصب منبع تولید پراکنده تغییری نکرده است به‌نحوی‌که به ازای تمام ظرفیت‌ها شین ۲ بدترین مکان و شین ۶ بهترین مکان نصب DG است.

جدول ۷: شاخص $PI^{(k)}$ به ازای نصب **DG** با ظرفیت‌های متفاوت در شین‌های شبکه

شماره شین	$PI^{(k)}$		
	۱۰ مگاوات	۵ مگاوات	۲/۵ مگاوات
۱	۰/۱۴۶۵	۰/۰۷۵۶	۰/۰۳۸۴
۲	۰/۳۵۳۳	۰/۱۹۰۱	۰/۰۹۸۹
۳	۰/۳۰۳۶	۰/۱۶۰۱	۰/۰۸۲۳
۴	۰/۲۷۳۳	۰/۱۴۳۲	۰/۰۷۳۳
۵	۰/۳۰۲۸	۰/۱۶۰۰	۰/۰۸۲۴
۶	۰/۱۲۱۲	۰/۰۶۲۴	۰/۰۳۱۶

۶-۴- مقایسه نتایج

در این بخش نتایج اعمال شاخص پیشنهادی در این مقاله با [۱۲] مقایسه گردیده است. روش پیشنهادی در [۱۲] دارای دو فاز مستقل است. در فاز اول مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان بدون حضور منابع تولید پراکنده حل گردیده و تنظیمات بهینه رله‌ها به دست آمده است. در ادامه تنظیمات بهینه به‌دست‌آمده در فاز اول، ثابت در نظر گرفته شده و در فاز دوم یک مسئله بهینه سازی دیگر حل گردیده است. در این مسئله بهینه‌سازی، حداکثر ظرفیت DG قابل‌نصب در هر شین به نحوی تعیین گردیده که قیود هماهنگی با همان تنظیمات فاز اول برقرار بماند. با توجه به این‌که در صورت نصب DG، و در نظر گرفتن تنظیمات فاز اول، قیود هماهنگی نقض می‌گردد، لذا در فاز دوم فاصله زمانی هماهنگی CTI کم‌تر از فاز یک در نظر گرفته شده است. بنابراین در فاز دوم CTI کاهش یافته و حداکثر ظرفیت DG قابل‌نصب روی هر شین به نحوی تعیین گردیده که قیود هماهنگی با CTI جدید رعایت گردد. سپس با معلوم بودن حداکثر ظرفیت قابل‌نصب روی هر شین (ΔP) و تغییرات CTI نسبت به فاز اول (ΔCTI)، شاخص PCI مطابق رابطه زیر محاسبه شده است:

$$PCI = -\frac{\Delta P}{\Delta CTI} \qquad (۱۵)$$

این شاخص برای تمامی شین‌های شبکه محاسبه می‌گردد. هرچه این شاخص برای یک شین بزرگ‌تر باشد به این مفهوم است که تغییرات بیش‌تر ظرفیت DG در آن شین باعث ایجاد تغییرات کم‌تری در فاصله زمانی هماهنگی گردیده است. به‌عبارت‌دیگر هرچه شاخص PCI برای یک شین بزرگ‌تر باشد، نصب DG در آن شین تأثیر کم‌تری بر هماهنگی رله‌های اضافه جریان داشته است.

در ادامه روش پیشنهادی [۱۲] به شبکه ۸ شینه اعمال گردیده است. با اعمال فاز اول بدون حضور DG مسئله هماهنگی حل گردیده و تنظیمات بهینه رله‌ها به دست آمده است. این تنظیمات قبلاً در بخش ۶-۱ محاسبه گردیده و در جدول ۱ آورده شده است.

برای اجرای فاز دوم روش پیشنهادی [۱۲]، تنظیمات بهینه رله‌ها ثابت در نظر گرفته شده و فاصله زمانی هماهنگی (CTI) از ۰/۳ به ۰/۲ کاهش یافته است. برای هر شین حداکثر ظرفیت DG قابل‌نصب به نحوی به دست آمده است که قیود هماهنگی رعایت گردد. برای حل این مسئله بهینه سازی ظرفیت DG با گام‌های ۰/۰۱ مگاوات افزایش یافته و محاسبات اتصال‌کوتاه انجام شده و قیود هماهنگی بررسی گردیده است. افزایش ظرفیت DG آن‌قدر ادامه یافته که اولین قید هماهنگی نقض گردد. در این شرایط حداکثر ظرفیت قابل‌نصب DG به دست آمده است.

روش پیشنهادی [۱۲] برای تمامی شین‌های شبکه ۸ شینه اجرا گردیده و نتایج آن در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۸: شاخص **PCI** مرجع [۱۲] به ازای نصب **DG** در شین‌های مختلف شبکه ۸ شینه

اولویت‌بندی شین‌ها	PCI	ΔP	شماره شین
۵	۲۸۰/۵	۲۸/۰۵	۱
۱	۹۳/۳	۹/۳۳	۲
۳	۱۴۱/۲	۱۴/۱۲	۳
۴	۲۰۲/۲	۲۰/۲۲	۴
۲	۱۲۷/۵	۱۲/۷۵	۵
۶	۴۵۷/۵	۴۵/۷۵	۶

مقایسه نتایج جدول ۸ با جدول ۶ نشان می‌دهد از دیدگاه شاخص $PI^{(k)}$ و شاخص PCI شین ۲ بدترین شین و شین ۶ بهترین شین برای نصب DG از دیدگاه مسئله هماهنگی بوده است. اولویت‌بندی بر اساس این دو شاخص به‌جز در اولویت ۲ و ۳ کاملاً مشابه است. مطابق جدول ۶، شین‌های ۵ و ۳ دارای شاخص $PI^{(k)}$ تقریباً یکسانی است که البته با توجه به موقعیت این دو شین در دیاگرام تک‌خطی و تقارن دیاگرام منطقی به نظر می‌رسد. اما از دیدگاه شاخص PCI شین ۵ اولویت بالاتری نسبت به شین ۳ دارد که البته تفاوت شاخص در این دو شین زیاد نیست.

اما نکته قابل‌ذکر برای مقایسه این دو شاخص این است که اولاً شاخص پیشنهادی $PI^{(k)}$ مستقل از تنظیمات رله‌ها اولویت‌بندی را انجام داده، درصورتی‌که شاخص PCI به تنظیمات بهینه رله‌ها نیاز دارد. ثانیاً به کمک شاخص پیشنهادی $PI^{(k)}$ می‌توان اولویت‌بندی قیود را نیز مطابق جدول ۴ انجام داد، درصورتی‌که شاخص PCI اولویت‌بندی را بر اساس تنها شین‌ها انجام می‌دهد. ثالثاً شاخص $PI^{(k)}$ نیاز به حل مسئله بهینه سازی ندارد و فقط بر اساس جریان خطای عبوری از رله‌ها محاسبه می‌گردد در صورتی‌که برای تعیین شاخص PCI برای هر شین باید یک مسئله بهینه‌سازی حل گردد.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله شاخص جدیدی به‌منظور ارزیابی اثر DG بر هماهنگی رله‌های اضافه جریان ارائه گردید. این شاخص به صورت تفاضل نسبی جریان‌های خطای عبوری از رله‌های پشتیبان و اصلی، مستقل از تنظیمات رله‌های اضافه جریان تعریف گردید. با روابط ریاضی ثابت گردید، شاخص پیشنهادی میزان تأثیر مکان و ظرفیت DG بر فاصله زمانی هماهنگی قیود را به‌درستی تعیین می‌نماید. نتایج اعمال این شاخص به یک شبکه ۸ شینه نشان داد علامت شاخص پیشنهادی به‌درستی مثبت یا منفی بودن تأثیر DG بر قید هماهنگی را تعیین می‌کند. همچنین مشاهده گردید؛ اندازه شاخص پیشنهادی متناسب با میزان تأثیر نصب DG بر قید هماهنگی است به‌نحوی‌که هرچه اندازه شاخص بزرگ‌تر باشد به همان نسبت فاصله زمانی هماهنگی برای آن قید در صورت نصب DG بیش‌تر کاهش می‌یابد. علاوه‌براین، بهترین

شین این شبکه که نصب DG در آن مکان کم‌ترین تغییرات در فاصله زمانی هماهنگی تمامی زوج رله‌های اصلی/پشتیبان ایجاد می‌کند تعیین شده است. در انتها زوج رله‌های از این شبکه نمونه که نصب DG بیش‌ترین تأثیر بر هماهنگی آن‌ها دارد به کمک شاخص پیشنهادی تعیین گردیده است.

مراجع

[1] J. M. Gers and E. J. Holmes, *Protection of Electricity Distribution Networks*, 2nd ed, ser. IEE Power and Energy Series 47. London, U.K.: IEE, 2004.

[2] A. J. Urdaneta, R. Nadira and L. G. Perez, "Optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power systems," *IEEE Transactions on Power Delivery,* vol. 3, no. 3, pp. 903–911, 1988.

[۳] نبی طاهری، رحمت‌الله هوشمند و رضا همتی، «برنامه‌ریزی هماهنگ نصب منابع تولید پراکنده و توسعه شبکه توزیع در حضور نامعینی بار و قیمت انرژی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۴، شماره۱، صفحه ۴۳-۵۶، بهار ۱۳۹۳.

[۴] سعید عباپور، کاظم زارع و بهنام محمدی ایواتلو، «ارزیابی جنبه‌های فنی و اقتصادی شبکه توزیع با هدف توسعه DG بر مبنای کاربرد مدیریت اکتیو در شبکه»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۴، شماره۴، صفحه ۳۵-۴۵، زمستان ۱۳۹۳.

[5] J. Gomez, J. Vaschetti, C. Coyos and C. Ibarlucea, "Distributed generation: impact on protections and power quality," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 11, no. 1, pp. 460–465, 2013.

[6] H. Yazdanpanahi, Y. Li and W. Xu, "A new control strategy to mitigate the impact of inverter-based DGs on protection system," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1427–1436, 2012.

[7] M. A. Haj-Ahmed and M. S. Illindala, "The influence of inverter-based DGs and their controllers on distribution network protection," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 4, pp. 2928 -2937, 2014.

[8] S. Chaitusaney and A. Yokoyama, "Prevention of reliability degradation from recloser—Fuse miscoordination due to distributed generation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 4, pp. 2545–2554, 2008.

[9] P. H. Shah and B. R. Bhalja, "New adaptive digital relaying scheme to tackle recloser-fuse miscoordination during distributed generation interconnections," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 4, pp. 682 -688, 2014.

[10] A. F. Naiem, Y. Hegazy, A. Y. Abdelaziz and M. A. Elsharkawy, "A classification technique for protection coordination assessment of distribution systems with distributed generation, " *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 1, pp.176 -185, 2012.

[11] N. Pholborisut, T. Saksornchai and B. Eua-arporn, "Evaluating the Impact of Distributed Generation on Protection System Coordination Using Protection Miscoordination Index," *The 8th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand-Conference*, pp. 865-868, 2011.

[12] H. Zeineldin, Y. R. Mohamed, V. Khadkikar and V. Pandi, "A protection coordination index for evaluating distributed generation impacts on protection for meshed distribution systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1523–1532, 2013.

[13] S. A. M. Javadian, M. R. Haghifam, M. Fotuhi-Firoozabad and S. M. T. Bathaee, "Analysis of protection system's risk in distribution networks with DG," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 44, no. 1, pp. 688-695, 2013.

[14] A. Saberi Noghabi, J. Sadeh and H. Rajabi Mashhadi, "Considering different network topologies in optimal overcurrent relay coordination using a hybrid GA," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 4, pp. 1857–1863, 2009.

زیرنویس‌ها

[1] Distributed Generation

[2] Protection Miscoordination Index

[3] Protection Coordination Index