پنجمین کنفرانس شبکه‌های توزیع نیروی برق

کاربرد سیستمهای هوشمند برای کاهش تلفات در شبکه‌های توزیع

شهرام جدید ـ مجید بابایک

دانشگاه علم و صنعت ایران ـ دانشکده مهندس برق

چکیده:

کاهش تلفات بوسیلهٔ تجدید آرایش در سیستمهای توزیع بواسطهٔ تغییر وضعیت کلیدهای تقسیم کننده صورت می‌گیرد. حل مسئله کاهش تلفات بوسیلهٔ تجدید آرایش، عبارت است از جستجوی کلیهٔ آرایشهای ممکن شبکه بطوری که ساختار شعاعی شبکه محفوظ بماند. این مقاله مسئله بکارگیری تکنیکهای سیستمهای هوشمند در کاهش تلفات و بحث تعیین قوانین لازم در روند استنتاج را ارائه می‌کند. علاوه بر این، در مسیر حل مسئله کاهش تلفات، همزمان، لحاظ کردن معیاری برای برقراری ارتباطی منطقی میان شرایطی که لازمهٔ کاهش تلفات بوده و نیز شرایطی که بر آن اساس از حدود کاری تجاوز نشود (شاخص تعادل بار) را، مطرح می‌کند که موجب افزایش اعتبار پاسخ نهایی می‌شود. به منظور حل شبکه توزیع در هر مرحله از تجدید آرایش، یک روش با سرعت و دقت مناسب برای محیط سیستمهای هوشمند ارائه شده است. نهایتاً سیستم مورد نظر بر روی شبکه استاندارد IEEE پیاده‌سازی و نتایج آن ارائه شده است.

کلمات کلیدی :

بهینه‌سازی ترکیبی، پخش بار، سیستمهای هوشمند، شبکه‌های توزیع، تلفات، روشهای ابتکاری.

۱ـ شرح مقاله :

شبکه‌های توزیع اولیه عمدتاً به دلیل مسائل کنترل و حفاظت ساختاری شعاعی دارند. عموماً قسمتهای مختلف از شبکهٔ توزیع بوسیلهٔ کلیدهای تقسیم کننده از طریق خطوطی (tie line) به یکدیگر متصل می‌باشند. تجدید آرایش در شبکهٔ توزیع از طریق تعیین وضعیت این کلیدها صورت گرفته، بطوری که نهایتاً یک ترکیب شعاعی از شاخه‌های شبکه به منظور برآوردن نیازهای خاصی ارائه می‌شود. نیاز به تجدید آرایش را می‌توان به دو دسته تقسیم‌بندی نمود؛ کاهش تلفات و حفظ تعادل بار. مسئله تجدید آرایش در شبکه‌های توزیع در سطوح مختلفی مطرح می‌شود. برای شبکه‌هایی که مراحل طراحی را گذرانده‌اند، انجام صحیح تجدید آرایش، یک آرایش ثابت و بهینه را از طریق تغییر وضعیت کلیدهای تقسیم کننده تعیین می‌کند. این آرایش تا زمانی که پروفیل بار تغییرات چندانی نکرده باشد، حفظ می‌شود. شبکه‌هایی که در یک دوره اختلاف پروفیل بار قابل ملاحظه‌ای دارند، بهترین نمونه برای اعمال تجدید آرایش می‌باشند که می‌باید در هر دوره بعد از هر تغییر قابل ملاحظه در پروفیل بار آرایش قبلی از طریق تجدید آرایش اصلاح شود. برای شبکه‌هایی که در دست طراحی می‌باشند، اعمال تجدید آرایش، مناسب‌ترین فیدرها را برای ارائه سرویس به مشترکین جدید، ارائه می‌کند.

اخیراً فعالیتهایی در زمینهٔ تجدید آرایش در سیستمهای توزیع صورت گرفته است. در مقالهٔ [1] سعی شده تا از نقطه نظر کاهش تلفات و بحث حداقل سازی یک تابع هدف، شرط حداقل سازی تلفات برای شبکه‌ای که بارهای آن به صورت جریان ثابت مدل‌سازی شده‌اند، فرمول‌بندی شود. در این مقاله فرمول‌بندی ارائه شده در [1] را از نقطه نظر یک معیار تعریف شده با عنوان شاخص تعادل بار، با قابلیت انعطاف بیشتری بدست می‌آوریم. در مقالهٔ دیگر [2] روابط کاهش تلفات برای انتقال بار بین دو فیدر، بر حسب کمیتهای شبکه بحث شده است. این دو روش در مقالهٔ دیگری [3] ادامه داده شده است.

از آنجا که بهینه‌سازی مناسب شبکه‌های توزیع از نوع ترکیبی می‌باشد، لذا در این مقاله علاوه بر روابطی که در قالب شاخص تعادل بار بدست آمده و فرمول‌بندی شده‌اند، برای هر یک از پارامترهای بهینه‌سازی ترکیبی از نتایج روابط محاسباتی بدست آمده در مراجع ذکر شده به عنوان قوانین حاکم بر روند استنتاج در سیستم هوشمند استفاده شده است. بنابراین این مقاله در ادامه مراجع [3-1]، بحث بهینه‌سازی ترکیبی را ارائه می‌کند. مرجع [4] کاربرد

سیستمهای هوشمند را در سیستمهای توزیع ارائه نموده است.

مقالهٔ حاضر، بواسطهٔ توانایی‌های لازم جهت جستجو و ارائه بصیرت سیستم خبره‌ای را در محیط Prolog مطرح می‌سازد.

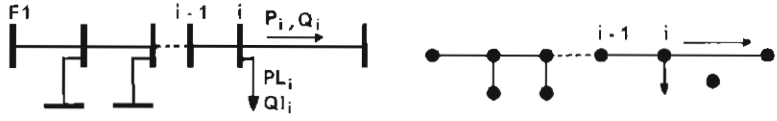
برای پیاده‌سازی این سیستم از یک مدل جامع و قانونمند استفاده شده است. این مدل تمامی پارامترهای شبکه را در برداشته و قانونهای استفاده شده محدود به شبکه خاصی نمی‌باشد.

در مقاله حاضر ابتدا مدل ارائه شده برای شبکه در سیستم هوشمند شرح داده می‌شود، سپس شاخص تعادل بار و بدست آوردن قانونی برای روند استنتاج آورده خواهد شد. در ادامه یک روش پخش بار سریع و مناسب برای محیط سیستمهای هوشمند ارائه شده و به دنبال آن نتایج اجراء سیستم ساخته شده برای یک شبکه نمونه و تجزیه و تحلیل نتایج آن گزارش می‌گردد.

۲ ـ مدل شبکه :

از آنجا که روش بکار برده شده برای کاهش تلفات در محیط Prolog پیاده شده است، لازم است برای بهبود ارائه بصیرت و کاهش زمان جستجو از مدل مناسبی استفاده کنیم. مدل شبکه بر اساس مدار تک خطی شبکهٔ مورد نظر ارائه و توسط مجموعه‌ای از فیدرهای اولیه (Primary feeder)، خطوط متصل کنندهٔ فیدرهای اولیه و بارهای شبکه، که به صورت نقطه‌ای (Spot load) برای هر فیدر مدل شده‌اند، توصیف می‌شود.

در این مدل، خطوط به صورت شاخه (branch)، فیدرهای اولیه به صورت گره (node) و مجموعاً به صورت یک درخت (tree) نمایش داده شده‌اند. Prolog شامل امکانات مناسبی از قبیل پردازش لیست و عبارتهای ترکیبی (Compound Objects) بوده و وجود این امکانات موجب تقسیم شبکه به قسمتهای مختلف گردیده و همگی با یک عبارت مشابه توصیف شوند. و نهایتاً با استفاده از همین امکانات، همگی این اجزاء به یکدیگر متصل شوند. مزیت این روش عدم تعریف مدلهای متفاوت برای اجزاء شبکه و جلوگیری از پیچیده شدن مدل سیستم می‌باشد.



« (الف) دیاگرام شبکه » « (ب) مدل گره و شاخه برای شبکه »

« شکل (۱) »

بطور مثال، مدل استفاده شده برای توصیف شبکه در prolog به صورت زیر می‌باشد:

Tree = branch (N-n, B-n, F-n, P, Q, PL, QL, PT, QT, V, R, X, F1, F2, TLIST)

TLIST = Tree*

در این مدل هر شاخه (Branch) بوسیلهٔ شمارهٔ گرهٔ (N-n) ابتدای خط، شماره گرهٔ (فیدر) پیشین (B-n)، شماره گرهٔ انتهای خط (F-n)، بارهای اکتیو و راکتیو جاری شده در ابتدای خط (P,Q)، بارهای تغذیه شده توسط گره متناظر با شاخه (PL , QL)، بارهای موقتی (PT , QT) برای ذخیرهٔ اطلاعات مربوط به آن شاخه حین عملیات محاسباتی، ولتاژ گره ابتدای (V)، مقاومت (R) و راکتانس (X) خط متناظر با آن شاخه، لیستی از تمامی زیر درختهایی که به گره مربوطه متصل‌اند (TLIST) و نیز دو پرچم (Flag) که مبین نوع خط می‌باشند، معرفی می‌شود. شاخه می‌تواند مربوط به یک خط عادی باشد (F1 = on) و یا اینکه یک خط شامل کلیدهای تقسیم کننده باشد (F1 = off) و اینکه آیا این کلید باز است یا بسته (F2 = on or off).

از مشخصات این روش ارائه بصیرت این است که دستیابی به جزء خاصی از شبکه و مشاهده اطلاعات آن با بیشترین سرعت جستجو در پایگاه حقایق (fact base) انجام می‌شود چرا که برای یک مجموعه اطلاعات مربوط به یک شاخه احتیاجی به جستجوی تک تک آن موارد نمی‌باشد بلکه تنها ارائه شماره گره یا فیدر (N-n) کافی است تا در جستجو به یک قالب (Frame) از اطلاعات مربوط به آن شاخه، دسترسی داشته باشیم.

از طرف دیگر ارائه اطلاعات از طرف کاربر (user) و دریافت آن توسط سیستم هوشمند بسیار ساده‌تر خواهد بود. چرا که بعد از تبدیل شبکه مورد نظر به فرم شاخه و گره، کاربر می‌تواند برای منظورهای خود، همچون گسترش شبکه پیشین، در کمترین زمان و کوتاه‌ترین عبارت مشخصات اجزاء جدید شبکه را وارد پایگاه داده‌های سیستم کند.

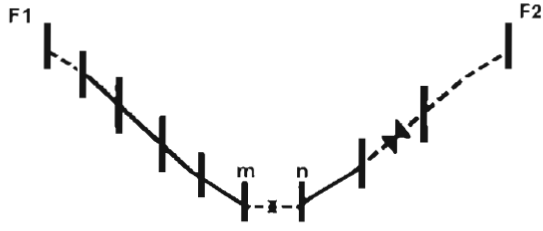
۳ ـ عملکرد سیستم هوشمند برای رسیدن به یک جواب بهینه :

به جهت شرایط شبکه توزیع از نقطه نظر بارهای مصرفی و خصوصیات فیزیکی، شبکه رفتاری غیر خطی داشته و بهینه‌سازی شبکه از نقطه نظر خاصی، نیاز به انجام یک بهینه‌سازی ترکیبی می‌باشد. هر گاه بهینه کردن شبکه از لحاظ کاهش تلفات مد نظر باشد، لازم است تا بوسیلهٔ تجدید آرایش شبکه از طریق باز و بسته کردن کلیدهای تقسیم کننده به یک آرایش بهینه برسیم. این عمل در محیط سیستم هوشمند بوسیلهٔ یک جستجو (Search) در کل حالات ممکن شبکه، برای رسیدن به یک جواب بهینه محلی یا جامع میسر است. هر گاه منظور، رسیدن به یک جواب بهینه محلی باشد، می‌توان قوانین حاکم بر روند استنتاج را مبتنی بر هدف مورد نظر

یعنی کاهش تلفات قرار داد. ولی برای نزدیک شدن به یک جواب بهینه جامع، می‌باید اهداف دیگری به موازات هدف اصلی مد نظر قرار گرفته و وارد قوانین حاکم بر جستجوی حالات بهینه شوند. بررسی‌های انجام شده در زمینهٔ کاهش تلفات در شبکه‌های توزیع، اکثراً به این نتیجه رسیده‌اند که انجام یک جستجوی فراگیر در همه حالات شبکه برای حداقل کردن تلفات، نهایتاً منجر به جوابی می‌شود که در موارد جنبی دیگر نظیر بهبود پروفیل ولتاژ و نیز بهبود تعادل بار در کل شبکه نیز پاسخ بهینه‌ای را داده‌اند. لذا به نظر می‌رسد برای انجام یک جستجوی فراگیر به منظور رسیدن به یک جواب بهینهٔ نزدیک جامع، از همان ابتدا این سه مورد یعنی، کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ و بهبود تعادل بار در شبکه می‌یابد وارد تصمیم‌گیری در هر مرحله شوند.

۴ ـ معیار پروفیل ولتاژ :

در شکل (۲) انتقال بار از F1 به F2 تنها در صورتی انجام می‌شود که $V_n > V_m$ باشد.



« شکل ۲ ـ شبکه نمونه برای تغییر وضعیت کلیدها. »

هر چند می‌توان شبکه‌ای را مثال زد که این قانون در مورد آن صدق نکند اما در یک شبکهٔ بزرگ عملاً ثابت شده است که اعمال چنین قانونی مسیر رسیدن به یک جواب بهینه را تعیین می‌کند. روش عمل در باز و بسته کردن کلیدها بدین صورت است که ابتدا کلید بازی را در نظر گرفته و به صورت زیر عمل می‌کنیم:

(i) - معیار پروفیل ولتاژ را آزمایش می‌کنیم که موجب انتخاب مجموعه کلیدهایی است که می‌توان بعد از بستن کلید مورد نظر باز شوند تا حلقه بر طرف شود.

مجموعه کلیدهایی که در سمت ولتاژ بالای کلید مورد نظر می‌باشند به عنوان کاندید برای عمل کلیدزنی و حذف حلقه بوجود آمده پس از بستن کلید اولیه، در نظر گرفته و در لیستی قرار می‌دهیم. اولویت‌بندی در این لیست بر حسب بیشتری اختلاف ولتاژ بین گرهٔ مربوط به کلید

کاندید شده و گرهٔ مربوط به کلیدی که قصد بستن آن را داریم، می‌باشد.

(ii) - اولین کلید از لیست کلیدهای مجاز را انتخاب کرده و مقدار کاهش تلفات را پس از بر طرف کردن حلقه بوسیلهٔ عمل کلیدزنی برآورد می‌کنیم. این برآورد می‌تواند بوسیلهٔ روابط بدست آمده برای کاهش تلفات پس از عمل کلیدزنی [1] یا محاسبهٔ تلفات بطور مستقیم بعد از هر عمل کلیدزنی، انجام شود.

(iii) - معیار تعادل بار را برای شبکه بدست آمده پس از عمل کلیدزنی و بر طرف کردن حلقه محاسبه می‌کنیم. در صورتی که این معیار بهبود یافته باشد، کلیدزنی مربوطه مورد تأیید می‌باشد و در غیر این صورت عضو دیگری از مجموعه کلیدهای کاندید شده واقع در لیست را انتخاب کرده و موارد (i)، (ii) و (iii) را مجدداً بررسی می‌کنیم.

۵ ـ جستجوی جامع :

از آنجا که در یک شبکهٔ طراحی شده تعداد محدودی کلیدهای تقسیم کننده (Sectionalizing Swiches) وجود دارد، در عمل به منظور رسیدن به یک جواب بهینهٔ نزدیک جامع می‌توان تعداد مناسبی خطوط دارای کلید تقسیم کننده مجازی را وارد پایگاه اطلاعات شبکهٔ مورد نظر کرده تا جامعیت شبکه نهایی ارائه شده توسط سیستم هوشمند، تحت تأثیر موقعیت ثابت و از پیش طراحی شدهٔ شبکه قرار نگیرد. لذا علاوه بر ارائه اطلاعات واقعی شبکه، لازم است تعدادی خطوط دارای کلیدهای تقسیم کننده در نظر گرفته و وارد پایگاه داده‌ها شوند. این خطوط باید دارای خصوصیات زیر باشند:

i) - حتی‌الامکان نزدیک به خطوط دارای کلیدهای تقسیم کننده باشند تا مدل واقعی شبکه خدشه‌دار نشود.

ii) - از آنجا که این خطوط در شرایطی که کلیدهای مربوط بسته می‌شوند، مانند خطوط معمولی عمل می‌کنند، باید پارامترهای آنها طوری در نظر گرفته شوند که تأثیر مثبتی در رسیدن به یک جواب بهینه از نقطه نظر کاهش تلفات نداشته باشند. چرا که منظور از وارد کردن این خطوط تغییر پیکربندی شبکه به طور مناسب‌تری از آنچه وجود دارد می‌باشد نه اینکه کاهش تلفات. بنابراین برای اینکه عامل کاهش تلفات تحت تأثیر این خطوط مجازی قرار نگیرد حتی‌الامکان امپدانس مقاومتی این خطوط را بالاتر از حد معمول در نظر می‌گیریم تا فقط در شرایط بحرانی که از نظر پیکربندی وضعیت نامطلوبی داریم، این خطوط انتخاب شوند.

در نهایت اگر جواب نهایی شامل چنین خطوطی بودند یکی از مراحل ذیل را می‌توان انتخاب نمود:

الف) موقعیت خطوط دارای کلیدهای تقسیم کننده را عوض کرده و در طراحی تغییراتی وارد کنیم.

ب) نزدیک‌ترین کلید تقسیم‌کننده به این کلیدها را که متعلق به طراحی ثابت شبکه بوده‌اند انتخاب کنیم.

۶ ـ معیار اندیس تعادل بار :

عملاً در شبکه‌های توزیع طراحی شده مشخصات خطوط یکسان نبوده و بر حسب دوری یا نزدیکی به فیدر اصلی و نوع بار متفاوت می‌باشد. بنابراین در یک شبکهٔ معین، می‌توان مشخصات خطوط را دسته‌بندی کرد. یکی از این مشخصات حداکثر جریان مجاز خطوط می‌باشد. برای یک شبکهٔ طراحی شده، برای هر یک از خطوط شبکه این حد دقیقاً معین است [5] بدین جهت مناسبت دارد تا شاخصی به نام شاخص تعادل بار را مطرح کنیم. در صورتی که این اندیس به صورت مناسبی تعریف شود، عدم اضافه بار و به دنبال آن کاهش تلفات در شبکه را تضمین خواهد کرد.

در اینجا شاخص تعادل بار را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$LB = \sum_{l=1}^{n} \left(\frac{S_l}{S_{l\,max}}\right)^n$$

هر گاه بخواهیم از ایدهٔ حداقل‌سازی این شاخص استفاده کنیم، بطوری که S_l، یعنی توان ظاهری که هر شاخه (l) عبور می‌دهد و از ولتاژ و جریان مربوط به گرهٔ متناظر با آن شاخه (N-n) تعیین می‌شود، و $S_{l\,max}$ حداکثر توان ظاهری مجاز آن شاخه باشد؛ می‌باید به طریقی این توانهای ظاهری را به حداکثر جریان مجاز خطوط ارتباط دهیم. با یک تقریب جریان متناظر با $S_{l\,max}$ برای ولتاژ نامی و ضریب قدرت واحد را به عنوان حداکثر جریان مجاز در نظر می‌گیریم (I_{lm}). در ضمن n = ۲ عدد مناسبی برای معیار حداقل‌سازی می‌باشد.

اکنون باید این معیار را به صورت قانونی درآورده و در روند استنتاج سیستم هوشمند بکار بریم.

۱ ـ ۶ ـ فرمول‌بندی اندیس تعادل بار :

شاخص تعادل بار را بر حسب جریان می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$LB = \sum_{l=1}^{n} \left(\left|\frac{I_l}{I_{lm}}\right| \right)^2 = \sum \frac{|I^r_l + j\, I^i_l|^2}{|I_{lm}|^2} = \sum \frac{(I^r_l)^2 + (I^i_l)^2}{|I_{lm}|^2}$$

اکنون شاخص تعریف شده را تحت قیدی که وابسته به بارهای تغذیه شده توسط شبکه است حداقل می‌کنیم.

$$A.I = J \ , \ \min \sum_{l=1}^{n} \frac{|I_l|^2}{|I_{lm}|}^2$$

این قید عبارت است از:

A : ماتریس تلاقی شبکه که جریان شاخه‌ها و جریان تزریقی در گره‌ها را به هم مرتبط می‌کند.

I_l : جریان جاری شده در شاخه lام.

J : بردار جریانهای تزریق شده در گره‌ها، $m \times 1$.

m : تعداد گره‌ها.

n : تعداد شاخه‌ها.

می‌توان اجزاء حقیقی و موهومی جریانها را تفکیک کرده و هر کدام را جداگانه حداقل کنیم:

$$\min \sum_{l=1}^{n} \frac{(I^r_l)^2}{(I_{lm})^2} \ , \ A.I^r = J^r$$

$$\min \sum_{l=1}^{n} \frac{(I^i_l)^2}{(I_{lm})^2} \ , \ A.I^i = J^i \qquad (1)$$

برای حداقل کردن از لاگرانژین استفاده کرده و خواهیم داشت:

$$\min C^r = \sum_{l=1}^{n} \left(\frac{I^{r\,2}_l}{I_{lm}^2} - \lambda^r (A \ . \ I^r - J^r) \right)$$

$$\min C^i = \sum_{l=1}^{n} \left(\frac{I^{i\,2}_l}{I_{lm}^2} - \lambda^i (A \ . \ I^i - J^i) \right) \qquad (2)$$

در اینجا λ^r و λ^i ضرایب لاگرانژ هستند که به صورت برداری می‌باشند.

$$\frac{\partial C^r}{\partial I^r_l} = 0 \quad , \quad \frac{\partial C^r}{\partial \lambda^r_a} = 0 \quad l = 1, 2, \ldots, n$$

$$\frac{\partial C^i}{\partial I^i_l} = 0 \quad , \quad \frac{\partial C^i}{\partial \lambda^i_a} = 0 \quad a = 1, 2, \ldots, m \qquad (3)$$

پس از مشتق‌گیری خواهیم داشت:

$$\frac{2}{I_{lm}} I^r_l + \lambda^r_a - \lambda^r_b = 0$$

$$l = 1, 2, ..., n \qquad (4)$$

$$\frac{2}{I_{lm}} I^i_l + \lambda^i_a - \lambda^i_b = 0$$

a و b گره‌های ابتدا و انتهای شاخهٔ lام می‌باشند.

بعد از انجام جمع بر (4) داریم:

$$\sum_l \frac{2\, I^r_l}{I_{lm}} = 0$$

$$\sum_l \frac{2\, I^i_l}{I_{lm}} = 0 \qquad (5)$$

نهایتاً بعد از عملیات مقدماتی خواهیم داشت.

$$\sum_l \frac{2}{I_{lm}} (I^r_l + j\, I^i_l) = \sum_{l=1}^{r} \frac{2}{I_{lm}} I_l = 0 \qquad (6)$$

نتیجهٔ (6) نشان می‌دهد که با داشتن I_{lm} برای هر یک از شاخه‌ها، می‌توان حداقل بودن شاخصی را که برای تعادل بار تعریف کردیم (LB) تعیین نمود. این شاخص همانطور که رابطهٔ (6) نشان می‌دهد، در بهترین حالت متعلق به تمامی شاخه‌های شبکه می‌باشد.

اما می‌توان بوسیلهٔ یک روش ابتکاری (huristic) محدوده‌ای را که بیشترین تأثیر را در رسیدن به یک جواب بهینهٔ جامع دارد، تعیین کرد. در سیستم هوشمند طراحی شده سعی کرده‌ایم تا این وابستگی به همه اجزاء شبکه را حفظ کنیم.

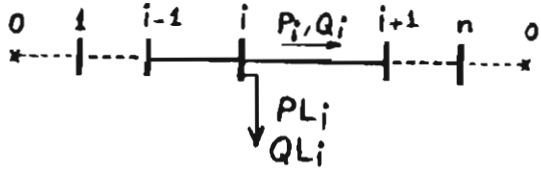
۷ ـ فرمول‌بندی معادلات پخش بار :

از مشخصات یک مدل مناسب در ارائه اطلاعات شبکه، سهولت استفاده از این مدل توسط برنامه‌های محاسباتی می‌باشد. در مدل انتخاب شده برای این سیستم، هر گره (فیدر) با گره قبل و بعد از آن تعیین می‌شود بطوری که دو مورد به عنوان قرارداد رعایت شده است:

(i) - شماره گرهٔ متناظر با یک فیدر اصلی (Substation) هر چه باشد، برای گرهٔ قبل از آن مقدار قراردادی صفر منظور شده است.

(ii) - در انتهایی‌ترین گرهٔ هر مسیر انشعابی از درخت متناظر با شبکه، شمارهٔ گره هر چه باشد، شمارهٔ گره بعد از آن را که وجود خارجی ندارد، به طور قراردادی صفر در نظر می‌گیریم. بطوری که یک شاخهٔ اضافی متناظر با آخرین گره (فیدر) وارد پایگاه داده‌ها می‌شود که باید پس از انجام صحیح محاسبات پخش بار در هر مرحله، کمیتهای توان اکتیو و راکتیو عبوری از

این شاخه برابر صفر شوند. در برنامه‌های محاسباتی از آنجا که از روشهای خود ارجاعی (Recursive) برای پخش بار استفاده شده است، کمیات این شاخه‌های مجازی محکی است برای رسیدن به جواب مناسب و قطع تکرار. اکنون معادلات پخش را با در نظر گرفتن شبکهٔ نمونه شکل (۳) بدست می‌آوریم:



« شکل ۳ ـ شبکه نمونه برای پخش بار: »

$$P_{i+1} = P_i - r_i \frac{P^2_i + Q^2_i}{V^2_i} - P_{Li+1}$$

$$Q_{i+1} = Q_i - x_i \frac{P^2_i + Q^2_i}{V^2_i} - Q_{Li+1}$$

$$V^2_{i+1} = V^2_i - 2 (r_i P_i + x_i Q_i) + (r^2_i + x^2_i) \frac{P^2_i + Q^2_i}{V^2_i}$$

معادلات بالا به معادلات پیشرو (Forward) معروف است [3]. بطوری که اگر P_i، Q_i و V_i در فیدر اصلی معلوم باشند می‌توان همه این مقادیر را در سایر شاخه‌ها و گره‌ها تعیین کرد. اما معمولاً کمیتهای انتهای شاخه‌ها را بهتر می‌توان تعیین کرد. بنابراین ابتدا معادلات پسرو (Backward) به صورت زیر استفاده می‌شوند [3].

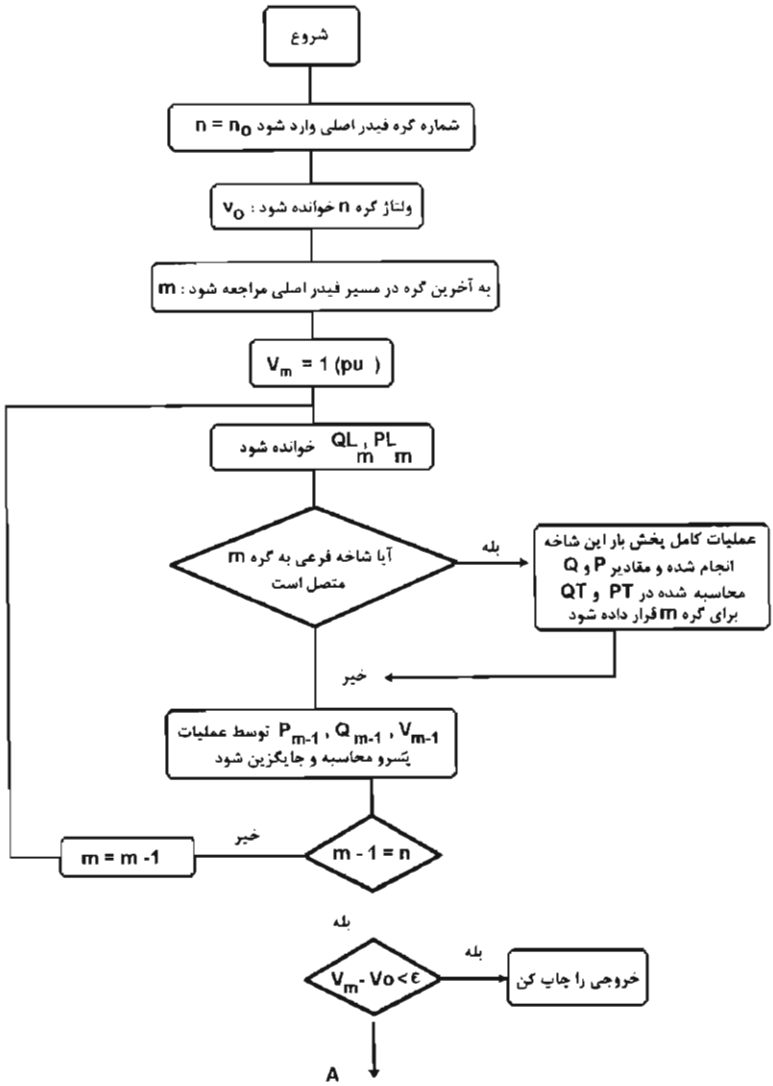
$$P_{i-1} = P_i + r_i \frac{P'^2_i + Q'^2_i}{V^2_i} + P_{Li}$$

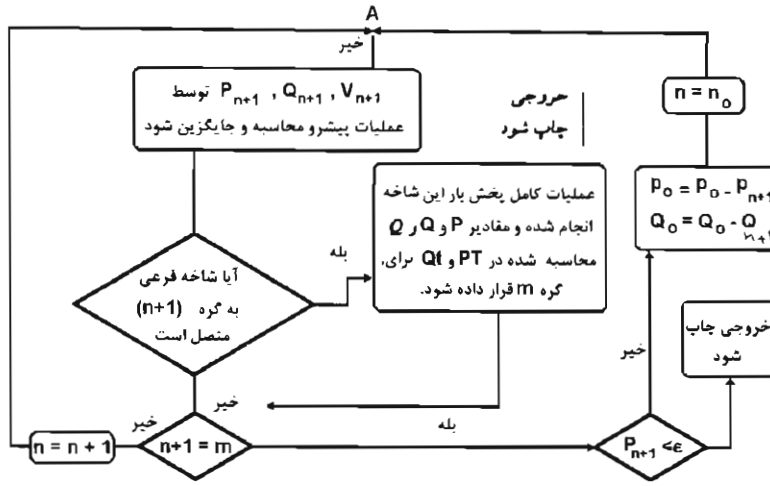
$$Q_{i-1} = Q_i + x_i \frac{P'^2_i + Q'^2_i}{V^2_i} + Q_{Li}$$

$$V^2_{i-1} = V^2_i + 2 (r_i P'_i + x_i Q'_i) + (r^2_i + x^2_i) \frac{P'^2_i + Q'^2_i}{V^2_i}$$

بطوری که داریم: $P'_i = P_i + P_{Li}$ و $Q'_i = Q_i + Q_{Li}$

با شروع از معادلات پسرو (Backward) و انجام یک سری عملیات خود ارجاعی (Recursive) به روز درآوردن کمیات P_i، Q_i و V_i در هر مرحله، می‌توان مراحل را تا آنجا ادامه داد که کمیتهای P_n و Q_n متعلق به شاخهٔ مجازی، برابر صفر شوند. پس از آن می‌توان وضعیت معیارهای مختلف را بر اساس اطلاعات پخش بار در آن مرحله بررسی کرد. شکل (۴) طرحوارهٔ استفاده از روابط پسرو و پیشرو در حل شبکه توزیع را نشان می‌دهد.





« شکل ۴ ـ طرحوارهٔ استفاده از روابط پیشرو و پسرو در حل شبکهٔ توزیع »

۸ ـ نتایج آزمایش سیستم طراحی شده :

سیستم هوشمند طراحی شده در محیط پرولوگ (Prolog) پیاده شده است و به جهت سادگی معادلات پخش بار و وجود امکانات مناسب برای اجراء توابع خود ارجاعی در این محیط، ترجیح داده شده است تا محاسبات در همین محیط انجام شود.

شبکهٔ مورد آزمایش یک سیستم ۴/۸ کیلوولت بوده و توسط گروه طراحی و توزیع IEEE برای انجام تست برنامه‌های حل شبکهٔ توزیع ارائه شده است. این سیستم دارای ۳۷ شین بوده و شامل ۶ خط با کلید تقسیم کننده (tie line) می‌باشد.

معمولاً هر شبکه دارای یک ستون اصلی (Backbone) با کمترین مقاومت برای تغذیهٔ بارهای انشعابی در طول آن می‌باشد. به منظور تست سیستم طراحی شده توسط خطوط کلیددار (tie line) که در قسمتهای مختلف شبکه قرار داده شده‌اند، سعی می‌کنیم تا آرایش نهایی شبکه را برای بارهایی با موقعیت جغرافیایی ثابت نسبت به یکدیگر تعیین کنیم.

شکل (۵) دیاگرام شبکهٔ مورد نظر را نشان می‌دهد و اطلاعات قبل از تجدید آرایش از مرجع [5] اخذ شده است. سیستم طراحی شده توسط کامپیوتر شخصی (PC) مدل 80386-SX با سرعت ۳۳ MHZ اجراء شده است و نتایج آزمایش در جدول شمارهٔ ۱ آورده شده‌اند.

« جدول ۱ ـ نتایج اجرای سیستم طراحی شده برای شبکه استاندارد. »

مراتب جستجو	شاخه وارد شده	شاخه خارج شده	مقدار کاهش تلفات (کیلووات)	حداقل ولتاژ در شبکه	مقدار شاخص تعادل بار
۱	۳۲	۳۴	۲۴/۲	۰/۸۶۶۰	۲/۲۱
۲	۳۳	۳۵	۳۸/۹	۰/۸۸۹	۱/۸۶
۳	۳۷	۳۶	۳۰/۲	۰/۹۰۱۱	۱/۷۵
زمان اجراء برنامه	۴/۵ (ثانیه)				

از بررسی نتایج آزمایش می‌توان به موارد زیر تأکید کرد:

۱ ـ برای بارهای معینی که موقعیت جغرافیایی ثابتی نسبت به یکدیگر دارند، باید یک ساختار عمده و مهم از فیدر اصلی با حداقل مقاومت به طور مناسب کل شبکه را طی کند.

۲ ـ بارهای نزدیک به هم را به گروه‌های جداگانه تقسیم‌بندی کرده و همگی را توسط یک انشعاب از ستون اصلی تغذیه نمائیم.

۳ ـ جدول شماره ۱ نشان می‌دهد که مسیر حداقل شدن تلفات به موازات پروفیل مناسب ولتاژ در کل شبکه حرکت می‌کند بطوری که حداقل ولتاژ شبکه با کاهش تلفات افزایش می‌یابد.

۴ ـ جدول شماره ۱ نشان می‌دهد که مسیر حداقل شدن تلفات به موازات کاهش شاخص تعادل بار حرکت می‌کند بطوری که با کاهش تلفات، شاخص تعادل بار نیز کاهی می‌یابد.

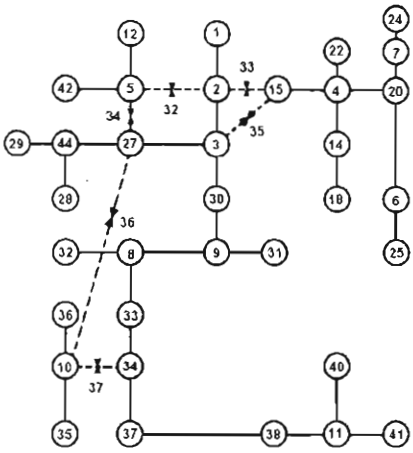
۵ ـ زمان اجراء برنامه به مقدار قابل توجهی تحت تأثیر برنامه پخش بار لازم در هر مرحله، قرار گرفته، بطوری که اجراء یک پخش بار با تقریب مناسب، تأثیر قابل توجهی بر زمان نهایی اجراء برنامه می‌گذارد.

۶ ـ در اجراء برنامه برای منظورهای عملی، می‌توان عملیات محاسباتی را به روتین‌هایی که در خارج از محیط سیستم هوشمند اجراء می‌شوند واگذار کرد تا نهایتاً زمان اجراء کل برنامه کاهش یابد.

۹ ـ نتیجه گیری :

نتایج آزمایش روش بکار گرفته شده در بهینه‌سازی، تناسب رضایت بخشی را در بهبود وضعیت عوامل مورد نظر در بهینه‌سازی نشان می‌دهد. بطوری که ادعای بهینه‌سازی شبکه به شرط بهبود وضعیت عوامل ذکر شده در نتایج آزمایش، تأیید می‌شود. بنابراین به نظر می‌رسد برای حداقل کردن تلفات در شبکه، اتخاذ روشهای «بهینه‌سازی ترکیبی» بر اساس خصوصیات

شبکهٔ توزیع روش مناسبی برای نیل به این هدف باشد. در این راستا شناخت شبکه‌های توزیع و تعریف معیارهای بهینه‌سازی بر این اساس، کمک شایانی به توسعه سیستمهای هوشمند طراحی شده می‌نماید.



« شکل ۵ ـ دیاگرام شبکهٔ ۳۷ شین. »

مراجع :

[1] D.Shirmohammadi and H.Wayne Hong, "Reconfiguration of electric distribution Networks for Resistive line losses Reduction" IEEE Trans. On power Delivery, Vol. 4, No. 2, April 1989, PP. 1492-1498.

[2] S.Civanlar, J.J. Grainger, and S.H. Lee, "Distribution Feeder Reconfigutration for loss Reduction", IEEE PES Winter Meeting, Feb. 1987, Paper no: 87 WM 140-7.

[3] M.E.Baran and F.WU, "Network Reconfiguration in Distribution systems for loss Reduction and load balancing" IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, April 1989, PP. 1401-1407.

[4] C.S.Chang, and T.S.Chang "An Expert System for on - line Security - Economic Load allocation on Distribution systems" IEEE Trans. on power delivery, Vol. 5, No. 1, January 1990, PP. 467-473.

[5] IEEE distribution Planning working Group Report "Radial distribution Test Feeders", IEEE Trans. on power systems, Vol. 6, No. 3, Auqust 1991.