**دانشگاه آزاد اسلامی**

**واحد تهران جنوب**

**پایان نامه کارشناسی**

# بررسی نامتعادلی بار در شبکه توزیع و روشهای کاهش آن

**استادراهنما:**

**جناب آقای دکتر نیکنام**

**دانشجو :**

**امیر عیسایی**

**۸۲۱۲۸۴۲۵۸۰**

**زمستان ۸۴**

## پیشگفتار

موضوع کلی این گزارش ، بررسی نامتعادلی با رواثر آن در تلفات شبکه توزیع می‌باشد که شامل دو فصل می‌باشد بدین ترتیب که در فصل اول اثر عدم تعادل بار در افزایش تلفات شبکه توزیع بوده و به طور کلی مربوط به مطالعات اولیه می‌باشد تا دید کلی از هدف گزارش بدست آید. فصل دوم به بررسی روشهای کاهش تلفات نامتعادلی بار اختصاص دارد.

فصل اول شامل دو بخش است که بخش نخست اثر عدم تعادل بار در افزایش تلفات در شبکه فشار ضعیف می‌باشد که به طور کلی به بررسی عدم تعادل بار در شبکه فشار ضعیف می‌پردازد و مقدار تلفات ناشی از آن محاسبه نمودخ و درصد آنرا نسبت به تلفات شبکه سراسری بیان می‌دارد. بدین وسیله به ارزش بررسی و تحقیق در این مورد پی برده می‌شود.

در بخش بعدی اثر عدم تعادل بار در افزایش تلفات ترانسفورماتورهای توزیع مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. از آنجائیکه ترانسفورماتورها مقداری تلفات نامتعادلی به علت غیر یکسانی مشخصات الکتریکی سیم پیچی ها دارند ، همچنین به عنوان یک واسط سبب انتقال نامتعادلی فشار ضعیف به سمت فشار متوسط می‌شوند ، لذا توجه به آن از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این بخش در مورد انواع اتصالات ترانسها بحث شده است و میزان تلفات نامتعادلی در دون ترانس YZ و $\Delta Y$ که بیشتر از همه در شبکه توزیع بکار می‌روند ، محاسبه شده است.

فصل دوم شامل دو بخش می‌باشد. در بخش اول الگوریتمی جهت تقسیم مناسب انشعابها بین فازها در شبکه فشار ضعیف ارائه شده است تا با متعادل کردن فازها تا حد امکان از تلفات ناشی از

نا متعادلی بار کاسته شود. همچنین این الگوریتم قادر است تا شبکه موجود را به شکل بهینه تغییر شکل دهد تا تلفات نامتعادلی آن به حداقل برسد.

در بخش دوم به بررسی امکان افزایش سطح مقطع نول به منظور کاهش مقاومت نول و به تبع آن کاهش تلفات نول پرداخته شده است. همانطور که از فصل اول نتیجه گرفته شده است تلفات نول حدود سه برابر تلفات نا متعادلی بار در فازها می‌باشد ، لذا نیاز به توجه و رسیدگی دارد. بخصوص در خطوط با بار زیاد اهمیت تعویض کابل‌های نول با سطح مقطع بالاتر به خوبی احساس می‌شود. سیستم زمین کامل علاوه بر این که نقش مهمی در حفاظت شبکه توزیع دارد ، تا حدی زیاد از مقاومت نول نیز می‌کاهد. بخش سوم به این موضوع اختصاص دارد بدین ترتیب که با احداث زمینهای متوالی تا حد زیادی از مقاومت نول کاسته شده و به تبع آن تلفات نول و تلفات نامتعادلی کاهش می‌یابد. لذا در این بخش با ارائه نمودارها و محاسبات به امکان احداث زمینهای متوالی پرداخته شده است.

# فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**


فصل اول : اثر عدم تعادل بار در افزایش تلفات شبکه توزیع

۱-۱-اثر عدم تعادل بار در افزایش تلفات شبکه فشار ضعیف.....۱

۱-۱-۱-تبعات نامتعادلی بار .....۱

۱-۱-۲-شبکه فشار ضعیف .....۲

۱-۱-۲-۱- عدم تساوی بار فازها[۴].....۲

۱-۱-۳- اضافه تلفات ناشی از جریان دار شدن سیم نول[۴].....۴

۱-۱-۴-رسم نمودار چگونگی‌رابطه‌بین افزایش عبور جریان از سیم نول و میزان .....۸
تلفات در شبکه (بار کاملاً اکتیو)[۳]

۱-۱-۵-شرایط لازم برای تعادل شبکه علاوه بر یکسان نمودن بار فازها.....۹

۱-۲- اثر نامتعادلی بار در افزایش تلفات ترانسفورماتورهای توزیع.....۱۱

۱-۲-۱-عملکرد نا متعادل ترانسفورماتورهای سه فاز[۶].....۱۱

۱-۲-۲-بارهای تکفاز روی ترانسفورماتورهای سه فاز.....۱۲

۱-۲-۳-بار تکفاز خط به خنثی در ترانسفورماتورهای سه فاز .....۱۳

۱-۲-۴-بررسی تلفات نامتعادلی در ترانسهای توزیع.....۱۵

۱-۲-۵-ارائه پیشنهاد جهت کم کردن تلفات نامتعادلی در ترانسفورماتورهای توزیع.....۲۱

فصل دوم : بررسی روش‌های کاهش تلفات ناشی از نامتعادلی بار

# فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**


۲-۱- ارائه الگوریتم جهت تعادل بار فازها ..... ۲۳

۲-۱-۱- اساس روش ..... ۲۳

۲-۱-۲-تعیین آرایش بهینه شبکه ..... ۲۸

۲-۱-۳-تخصیص انشعاب جدید بودن تغییر آرایش شبکه..... ۳۱

۲-۱-۴-تخصیص انشعاب جدید به شبکه بهینه شده ..... ۳۴

۲-۱-۵-ارائه الگوریتم ..... ۳۸

۲-۲- امکان سنجی افزایش سطح مقطع نول ..... ۴۳

۲-۲-۱- امکان سنجی افزایش سطح مقطع نول در خطوط با بار سبک..... ۴۴

۲-۲-۲-امکان سنجی افزایش سطح مقطع در خطوط با بار متوسط ..... ۵۲

۲-۲-۴-امکان سنجی افزایس سطح مقطع نول در خطوط با شعاع تغذیه طولانی..... ۵۵

۲-۲-۵- نتیجه گیری ..... ۵۹

۲-۳- سیستم زمین و اثر آن در کاهش تلفات شبکه توزیع ..... ۶۰

۲-۳-۱- تلفات در سیستم نول [۱]..... ۶۱

۲-۳-۲- کاهش تلفات در سیم نول ..... ۶۱

۲-۳-۳-کاهش افت ولتاژ در سیم نول ..... ۶۴

۲-۳-۴- اثر زمین نول در محل مصرف ..... ۶۴

# فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**


۲-۳-۵- زمین کردن شبکه توزیع ..... ۶۵

۲-۳-۶-مقاومت سیم اتصال زمین و مقاومت زمین[۹]..... ۶۶

۲-۳-۶-۱- مدل خط توزیع ..... ۶۷

۲-۳-۶-۲- اثر نامتعادلی فازها بر روی تلفات با توجه به سیستم زمین ..... ۷۰

۲-۳-۶-۳-حساسیت تلفات نسبت به مقاومت اتصال به زمین ..... ۷۲

۲-۳-۶-۴- جنبه اقتصادی خطا در تلفات ..... ۷۴

۲-۳-۶-۵- مقایسه هزینه ایجاد سیستم زمین و صرفه جوئی ناشی از کاهش تلفات پیک... ۷۶

۲-۳-۶-۶- اثرات جریان عبوری از سیستم زمین ..... ۷۷

مراجع ..... ۷۸

# فهرست اشکال

**عنوان** **صفحه**


شکل (۱-۱):دیاگرام برداری جریانهای فازها و جریان نول .....۵

شکل (۱-۲):درصد افزایش تلفات برحسب افزایش عبور جریان از سیم نول .....۹

شکل(۱-۳):دیاگرام برداری جهت محاسبه جریان نول.....۱۰

شکل(۱-۴):بار تکفاز در ترانسفورماتورهای سه فاز.....۱۳

شکل(۱-۵):بار تکفاز بین خط خنثی در گروه ترانسفورماتور Yyبدون خط خنثی.....۱۴

شکل(۱-۶):بار خط به خنثی فاز A گروه ترانسفورماتور Yy .....۱۵

شکل(۱-۷):ترانسفورماتورDY با سیم نول .....۱۶

شکل (۱-۸): مقادیر جریانها در ترانسفورماتور DY با سیم نول .....۱۸

شکل(۱-۹): ترانسفورماتور YZ با سیم نول .....۲۰

شکل (۲-۱):شبکه شعاعی از یکسو تغذیه .....۲۴

شکل(۲-۲):جریانهای فاز در شبکه شعاعی.....۲۵

شکل(۲-۳):شبکه شعاعی با در نظر گرفتن تعداد انشعابها به جای جریان آنها .....۲۷

شکل(۲-۴):شبکه شعاعی از یکسو تغذیه با سه گره .....۲۸

شکل(۲-۵):متعادل سازی انشعابها در گره‌ها .....۲۹

شکل(۲-۶):مجموع انشعابهای فازها پس از متعادل سازی انشعابهای گره‌ها.....۲۹

شکل(۲-۷): متعادل سازی مجموع انشعابهای فازها .....۳۰

# فهرست اشکال

**عنوان** **صفحه**


شکل(۲-۸): شبکه مثال (۱) .....۳۱

شکل (۲-۹): شبکه پس از تخصیص انشعاب جدید به فاز S در گره سوم .....۳۱

شکل(۲-۱۰):شبکه پس از تخصیص انشعاب جدید به فاز T در گره سوم .....۳۲

شکل(۲-۱۱):شبکه پس از تخصیص انشعاب جدید به فاز Rدر گره سوم.....۳۲

شکل(۲-۱۲):شبکه پس از تخصیص انشعاب جدید به فاز R در گره سوم .....۳۳

شکل(۲-۱۳):شبکه پس از تخصیص انشعاب جدید به فاز S در گره دوم .....۳۳

شکل (۲-۲۴): شبکه پس از تخصیص انشعاب جدید به فاز T در گره دوم .....۳۴

شکل (۲-۱۵): شبکه بهینه شده مثال .....۳۵

شکل(۲-۱۶):شبکه پس از تخصیص انشعاب جدید به فاز R در گره سوم .....۳۵

شکل(۲-۱۷): شبکه پس از تخصیص دومین انشعاب به فاز R در گره سوم .....۳۶

شکل(۲-۱۸):شبکه پس ازتخصیص دومین انشعاب به فاز S در گره سوم .....۳۶

شکل(۲-۱۹):شبکه پس از تخصیص دومین انشعاب به فازT در گره سوم .....۳۷

شکل(۲-۲۰):شبکه پس از تخصیص انشعاب به فاز S در گره دوم .....۳۷

شکل(۲-۲۱):شبکه پس از تخصیص انشعاب به فاز T در گره دوم .....۳۸

شکل (۲-۲۲): الگوریتم متعادل سازی بار فازها و افزودن انشعاب جدید در شبکه فشار ضعیف....۴۲

شکل (۲-۲۳):مدارشماتیک جهت نمایش عبور بخشی از جریان نول توسط سیستم زمین.....۶۲

# فهرست اشکال

**عنوان** **صفحه**


شکل(۲-۲۴):تقسیم جریان در دو مقاومت موازی .....۶۳

شکل (۲-۲۵):مدار معادل مثال .....۶۵

شکل(۲-۲۶):مدل خط توزیع با چهار سیم .....۶۷

شکل(۲-۲۷):مدل نمونه خط توزیع برای شرح محاسبات .....۶۸

شکل(۲-۲۸):تغییرات تلفات بر حسب میزان نامتعادلی بار.....۷۱

شکل(۲-۲۹):توزیع جریان سیم نول در حالت بار نامتقارن با مقاومتاتصالزمینRg .....۷۲

شکل(۲-۳۰): تأثیر مقاومت اتصال زمین Rg بر روی تلفات خط .....۷۳

شکل(۲-۳۱): نسبت تلفات در فیدر با مقاومت اتصال زمین مشخص به تلفات .....۷۴

در فیدر با اتصال زمین کامل

شکل(۲-۳۲):ارزش کنونی تلفات خطوط انتقال .....۷۶

# فهرست جداول

**عنوان** **صفحه**

جدول(۲-۱):قیمت‌کابلهای۴رشته‌ای‌وتک‌رشته‌ای که درسطح ولتاژ توزیع به‌کاربرده‌میشوند.....۴۴

جدول(۲-۲):میزان کاهش مقاومت سیم نول در اثر زمین کردن .....۶۳

جدول (۲-۳):ماتریس امپدانس ۶۰HZ .....۶۹

جدول (۲-۴):شکل مؤلفه‌های متقارن معادل .....۷۰

جدول(۲-۵):امپدانس خطوط با زمین مستقیم .....۷۰

جدول(۲-۶):تلفات خطوط با زمین مستقیم .....۷۱

جدول(۲-۷): تقسیم تلفات بین خط و اتصال زمین .....۷۲

جدول(۲-۸): تلفات در فیدرهای با بار توزیع شده متمرکز.....۷۵

# فصل اول

## اثر عدم تعادل بار در افزایش تلفات

## شبکه توزیع

## ۱- اثر عدم تعادل بار در افزایش تلفات شبکه توزیع

یکی از مؤلفه‌های مطرح در افزایش تلفات شبکه توزیع مسأله عدم تعادل بار در این شبکه اعم از شبکه فشار ضعیف ، ترانسفورماتورهای توزیع و شبکه فشار متوسط می‌باشد. این مؤلفه که به عنوان یک عامل اختلال در عملکرد شبکه توزیع اعلام وجود می‌کند به دو صورت عدم تساوی بار فازها و عدم تساوی ضریب توان بار فازها ( یا ترکیبی از هر دو ) متظاهر می‌گردد و باید در هریک از بخشهای سه گانه شبکه توزیع مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار بگیرد.

با آماری که از پستها و شبکه توزیع تهیه شده عدم تعادل بار مأیوس کننده است و این مشخصه نشان دهنده عدم رعایت اصول فنی از طرف پرسنل توزیع و بعضاً سهل انگاری و عدم وجود دانش فنی در ایجاد شبکه‌های برق رسانی مبتنی بر اصول فنی برای مصرف کننده‌ها می‌باشد.

### ۱-۱- اثر عدم تعادل بار در افزایش تلفات شبکه فشار ضعیف

#### ۱-۱-۱- تبعات نامتعادلی بار

الف) افزایش تلفات قدرت : تلفات قدرت در شبکه فشار ضعیف شامل دو دسته تلفات قدرت در فازها و تلفات قدرت در سیم نول می‌باشد. با فرض ثابت بودن مجموع جریان سه فاز ، تلفات قدرت در فازها در حالت عدم تعادل بار بیش از تلفات در حالت تعادل بار بوده که به آن تلفات در نول هم اضافه می‌شود و با توجه به این امر که اکثراً مقاطع سیمها در نول نصف مقاطع سیم فازها و بنابراین مقاومت اهمی سیم نول حدود دو برابر مقاومت سیم فازها می‌باشد ، تلفات حتی در حالت جریانهای عبوری کم ، باز هم قابل توجه است.

ب) افت ولتاژ در اثر نامتعادلی : حتی با فرض این که سیمهای فاز در شبکه مقاطع یکسان و در نتیجه امپدانس مساوی داشته باشند ، در اثر عبور جریان نا برابر ، سیمهای فاز افت ولتاژ متفاوتی داشته و در نتیجه دارای ولتاژ نامتعادلی در طرف مصرف کننده‌ها بخصوص مصرف کننده‌های حساس مانند موتورهای سه فاز خواهند بود. این موضوع اثرات نامطلوبی بر مصرف کننده‌های سه فاز خواهد داشت.

ج) خطرات ناشی از جریان دار شدن سیم نول : با نامتعادل شدن جریان در سیستم سه فاز و عبور جریان از سیم نول ، نسبت به زمین دارای ولتاژی می‌شود که درصورت عبور از حد مجاز از نظر ایمنی نامطلوب بوده و چنانچه مصرف کننده با سیم نول تماس حاصل کند ، احتمال برق گرفتگی وجود خواهد داشت. علاوه بر مسائل یاد شده زیاد بودن نامتعادلی بار شبکه باعث وضعیت نامطلوبی در اجزاء دیگر شبکه از جمله ترانسفورماتورها خواهد شد.

**۱-۱-۲- شبکه فشار ضعیف**

عدم تعادل بار در شبکه ضعیف بدلایل زیر بوجود می آید :

- عدم تساوی بار مشترکین در هر لحظه روی هر فاز

- وجود شبکه‌های تکفاز طولانی و پربار روی خطوط فشار ضعیف

- وجود لوازم برقی تکفاز موتوری با ضریب توان پائین روی خط ( مثل موتورهای تکفاز جوشکاری و۰۰۰) نامتعادلی بار ، به دو صورت عدم تصاوی بار فازها و جریان دار شدن سیم نول باعث افزایش تلفات شبکه می‌شود.

### ۱-۱-۲-۱- عدم تساوی بار فازها [۴]

در یک خط فشار ضعیف سه فاز با فرض ثابت بودن مجموع بار فازها ، اگر بار فازها بصورت نا متعادل توزیع شده باشد ، طبق نا مساوی کوشی ، تلفات ایجاد شده در سیمهای فاز بیشتر از تلفات حالتی است که بار فازها به طور مساوی تقسیم شده باشند.

$a^2+b^2+c^2 \geq 3(\frac{a+b+c}{3})^2$ نا مساوی کوشی

اگر بارهای هر فاز به ترتیب $I_T, I_S, I_R$ و بار متوسط آنها را $I_m$ بنامیم ، خواهیم داشت :

$$I_R^1 + I_S^2 + I_T^2 \geq 3I_m^2$$

اگر طول خط L و مقاومت واحد طول خط به اهم R فرض شود داریم :

$$LRI_R^2 + LRI_S^2 + LRI_T^2 \geq 3LRI_m^2$$

در مورد خطوط فشار ضعیف موجود که بار آنها در چند نقطه از خط برداشته می‌شود ، بهترین راه برای توجیه قضیه فوق و همچنین اندازه گیری افزایش تلفات ناشی از عدم تعادل بار پیدا کردن الگوی مناسب برای آنهاست. تلفات در یک فاز با توزیع یکنواخت طبق فرمول چنین می‌باشد (Iچگالی واحد طول جریان می‌باشد $(I_R = iL)$ ) :

$$\Delta P_{1ph} = \int^{L} i^2 R dL = \frac{1}{3} LRI_R^2$$

در صورت مساوی بودن بار سه فاز $\Delta P_{1ph} = \frac{1}{3} LRI_m^2$

در نتیجه : (۱-۱) $\frac{1}{3} L_R {I_R}^2 + \frac{1}{3} LRI_S^2 + \frac{1}{3} LRI_T^2 \geq 3(\frac{1}{3})LRI_m^2$

حال جهت محاسبه اضافه تلفات سیم‌های فاز ناشی از عدم تساوی بار فازها ، اگـر انـدازه آن $\Delta p_u$ نامیده شود و تلفات در حالت تساوی بار فازها و عدم تسـاوی بـار فازهـا در سـیمهای فـاز $\Delta p_b$ و $\Delta p_{ph}$ باشد خواهیم داشت :

$$\Delta p_{ph} = \Delta p_b + \Delta p_u \qquad (۲-۱)$$

$$\Delta p_b = 3(\frac{1}{3} LRI_m^2) = LRI_m^2 = LR(\frac{I_R + I_S + I_T}{3})^2 \qquad (۳-۱)$$

$$\Delta p_{ph} = \frac{1}{3} LRI_R^2 + \frac{1}{3} LRI_S^2 + \frac{1}{3} LRI_T^2 \qquad (۴-۱)$$

$$\Delta p_u = \frac{2}{9} RL\left[I_R{}^2 + I_S{}^2 + I_T^2 - I_R I_S - I_S I_T - I_R I_T\right]$$

$$= \frac{1}{9} RL\left[(I_R - I_S)^2 + (I_S - I_T)^2 + (I_T - I_R)^2\right] \qquad (۵-۱)$$

همانگونه که ملاحظه می‌شود اضافه تلفات ناشی از عدم تساوی بار فازها فقط به اندازه آنها بستگی داشته و ارتباطی به ضریب توان آنها ندارد. همچنین در صورت تساوی بار فازها عبارت داخل پرانتز صفرشده و مقدار اضافه تلفات مذکور نیز صفر می‌گردد.

حال با فرض اینکه تلفات اضافی ناشی از عدم تساوی بار فازها بعلت جریان عدم تساوی بار $I_u$ در هر فاز به طور مستقل با توزیع یکنواخت عمل نماید :

$$RL_{ub}^l = \frac{1}{3} RLI_u^2 + \frac{1}{3} RLI_u^2 + \frac{1}{3} RLI_u^2 = \frac{2}{9} RL\left(I_R^2 - I_R I_S\right)$$

$$\Rightarrow I_u^2 = \frac{2}{9}(\sum I_R^2 - \sum I_R I_S)$$

$$\Rightarrow I_u = \frac{12}{3}\sqrt{2(\sum I_R^2 - \sum I_R I_S} = \frac{1}{3}\sqrt{(I_R - I_S)^2 + (I_S - I_R)^2 + (I_T - I_R)^2} \quad (۶-۱)$$

یعنی هر قدر تفاوت جریان سه فاز نسبت به یکدیگر بیشتر باشد ، جریان عدم تساوی بار بیشتر بوده و تلفات مربوط به آن بیشتر می‌شود. هرقدر بار سه فاز به یکدیگر نزدیکتر باشند جریان عدم تساوی بار کمتر شده و تلفات حاصله نیز کمتر می‌گردد.

### ۱-۱-۳- اضافه تلفات ناشی از جریان دار شدن سیم نول [۴]

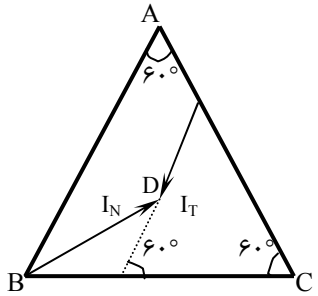
از آنجائیکه جمع برداری جریان سه فاز از داخل سیم نول عبور می‌نماید جریان سیم نول به مجموعه عوامل عدم تساوی بار فازها و تفاوت ضریب توان بار فازها بستگی دارد.

اما از آنجائیکه مشترکین تکفاز ، عموماً خانگی و تجاری می‌باشند و ضریب توان اینگونه مشترکین بعلت نبود بارهای موتوری بزرگ عمدتاً حدود ۰/۹ می‌باشد. بنابراین تفاوت ضریب توان بار فازها چندان قابل توجه نیست لذا با تقریب خوبی می‌توان اختلاف فاز بین جریانهای فازهای هر خط را $120^o$ در نظر گرفت ، بدین ترتیب و با توجه به شکل (۱-۱) جریان نول را می‌توان محاسبه کرد :

$$DE = I_S - I_T$$

$$BE = I_R - I_S$$

$$I_N^2 = DE^2 + BE^2 - 2BE.DE\cos 120^o$$




شکل (۱-۱) : دیاگرام برداری جریانهای فازها و جریان نول

$$= (I_S - I_T)^2 + (I_R - I_S)^2 + 2(I_S - I_T)(I_R - I_S) \times \frac{1}{2}$$

$$= I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 - I_R I_S - I_S I_T - I_T I_R$$

$$\Rightarrow I_N = \sqrt{\sum I_R^2 - \sum I_R I_S} = \sqrt{\frac{1}{2}\left[(I_R - I_S)^2 + (I_T - I_R)^2 + (I_T - I_S)^2\right]} \quad (۷-۱)$$

ملاحظه می‌شود جریان نول به تفاوت اندازه بار فازهای خط بستگی داشته و هر قدر این بارها بهم نزدیکتر باشند ، جریان نول کمتر و بر عکس هر چقدر اندازه بارها نسبت بهم دور باشند جریان نول بیشتر می‌گردد. با در نظر گرفتن الگوی توزیع جریان یکنواخت روی سیم نول ، اندازه تلفان آن برابر است با :

$$PL_N = \frac{1}{3} L R_N I_N^2$$

بادر نظر گرفتن رابطه (۱-۷) و با توجه به اینکه مقطع سیم نول را عموماً نصف مقطع فاز در نظر می‌گیرند و به تبع آن مقاومت سیم نول دو برابر مقاومت فازهاست ، خواهیم داشت :

$$PL_N = \frac{1}{3} L \times 2R{I_N}^2 = \frac{2}{3} LR{I_N}^2 \quad (۸-۱)$$

$$= \frac{1}{3} LR\left[(I_R - I_S)^2 + (I_S - I_T)^2 + (I_T - I_R)^2\right]$$

با مقایسه روابط (۱-۶) و (۱-۷) با روابط (۱-۵) و (۱-۸) نتیجه می‌شود که :

$$I_N = \frac{3\sqrt{2}}{2} I_u \quad (۱۰-۱)$$

$$I_N = 3\Delta P_u \quad (۱۱-۱)$$

به عبارت دیگر با محاسبه تلفات اضافی ناشی از عدم تساوی بار فازها روی سه فـاز خـط مـی‌تـوان تلفات اضافی مربوط به جریان دار شدن سیم نول را محاسبه کرد و بالعکس. اما از آنجائیکه جریان نول را می‌توان در نمونه‌های مورد مطالعه اندازه گیری نمـود ، راه بهتـر محاسـبه تلفـات ناشـی از جریان دار شدن سیم نول و سپس بدست آوردن تلفات اضافی مربوط بـه عـدم تسـاوی بـار فازهـا مطابق رابطه (۱۰-۱) می‌باشد.

بدترین حالت مربوط به ایجاد تلفات در سیم نول ، برای خطوط تکفاز یا خطوط با انشعابهای فرعی طولانی تکفاز اتفاق می‌افتد زیرا در آن صورت جریان فاز تماماً از سیم نـول عبـور نمـوده و تلفـات قسمت تکفاز شبکه را شش برابر می‌کند. تلفات در شبکه تکفاز با سیم نول به مقطع نصف مقطـع فاز یا شبکه دو فاز با سیم نول به مقطع نصف مقطع فاز ، مطابق با آنچه که در زیر آمده اسـت بـه ترتیب به نه برابر و سه برابر افزایش می‌یابد. در روابـط زیـر ، $I_{ph}$ جریـان فـاز و $\Delta p_{3\,ph}$ تلفـات شبکه سه فاز می‌باشند.

$$I_N = I_{ph}$$

$$\Delta_{1ph} = \frac{1}{3} LRI_{ph}{}^2 + \frac{1}{3} LR_N I_N{}^2$$

$$\Delta P_{1ph} = \frac{2}{3} LRI_{ph}{}^2 \qquad (۱۲-۱)$$

در صورتیکه اگر همین شبکه سه فاز می‌بود و بار آن متعادل تقسیم می‌شد ، تلفات برابر بود با :

$$\Delta p_{3\,ph} = 3 \times \frac{1}{3} LR(\frac{I_{ph}}{3})^2 = \frac{1}{9} LRI_{ph}{}^2$$

$$\Rightarrow \Delta P_{1ph} = 6\Delta p_{3\,ph}$$

تلفات در شبکه تکفاز با مقطع نول نصف مقطع فاز عبارتست از :

$$\Delta p_{1ph} = \frac{1}{3} LRI_R{}^2 + \frac{1}{3} LR_N I_N{}^2$$

$$= \frac{1}{3} LRI_R{}^2 + \frac{2}{3} LRI_R{}^2 = LRI_R{}^2$$

اگر جریان نول صفر می‌بود یا به عبارت دیگر شبکه سه فاز متعادل به جای شبکه تکفاز مورد نظـر کشیده می‌شد ، آنگاه تلفات مربوط چنین می‌شد :

$$\Delta P_{3\,ph} = 3 \times \frac{1}{3} LR(\frac{I_R}{3})^2 = \frac{1}{9} LRI_R{}^2$$

$$\Delta P_{1ph} = 9\Delta P_{3\,ph} \qquad (۱۳-۱)$$

تلفات در شبکه دو فاز با مقطع سیم نول نصف مقطع سیم فاز برابر است با : $I_N = I_{2ph}$

$$\Delta p_{2\,ph} = \frac{1}{3} LRI_R{}^2 + \frac{1}{3} LRI_S{}^2 + \frac{2}{3} LRI_{2ph}{}^2$$

اگر $I_S = I_R$ باشد ، آنگاه : $\Delta p_{2\,ph} = \frac{4}{3} LRI_{2ph}{}^2$

اگر همین شبکه سه فاز با بار متعادل می‌بود :

$$I_{3\,ph} = \frac{2}{3} I_{2ph}$$

$$\Delta P_{3\,ph} = 3 \times \frac{1}{3} LR\left(I_{3\,ph}\right)^2 = \frac{4}{9} LR\left(I_{2ph}\right)^2$$

$$\Rightarrow \Delta P_{2ph} = 3\Delta P_{3\,ph} \qquad (۱۴-۱)$$

**۱-۱-۴- رسم نمودار چگونگی رابطه بین افزایش عبور جریان از سیم نول و میزان تلفات در شبکه (بار کاملاً اکتیو) [۳]**

چنانچه سطح مقطع سیم نول برابر سیم فاز فرض شود.

$$PL_N = LRI_N{}^2 = LR\left(I_R{}^2 + I_S{}^2 + I_T{}^2 - I_R I_S - I_S I_T - I_R I_T\right)$$

$$\text{از دیاد تلفات} = \frac{5}{3} RL\left(I_R{}^2 + I_S{}^2 + I_T{}^2 - I_R I_S - I_S I_T - I_T I_R\right) \qquad (۱۵-۱)$$

برای حالتی که سطح مقطع سیم نول نصف سیم فاز باشد : (تلفات سیم نول ) $= \frac{8}{3}$ ازدیاد تلفات

$$I_N = \frac{a}{100}\frac{\left(I_R + I_S + I_T\right)}{3} \quad , \quad a = \frac{I_N}{I_m}$$ ( $I_m$ جریان متوسط سه فاز است )

با توجه به رابطه (۱-۱۵) ازدیاد تلفات برابرخواهد بود با :

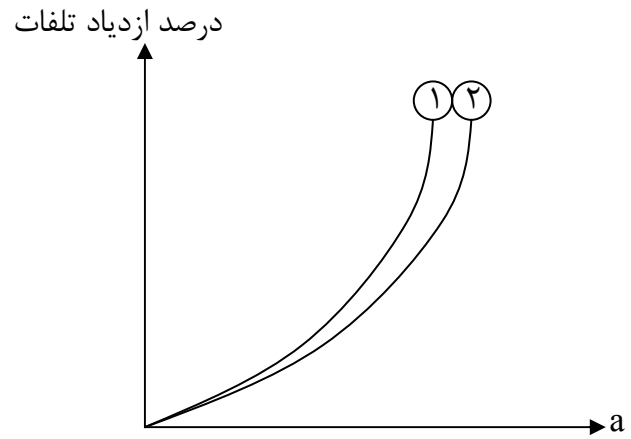
$$\text{ازدیاد تلفات} = \frac{5}{3} L\left(\frac{R.a^2}{18000}.\frac{\left(I_R + I_S + I_T\right)^2}{3}\right.$$

$$\text{درصد ازدیاد تلفات} = \frac{a^2}{180}$$

$$\frac{\text{ازدیاد تلفات}}{\text{تلفات در حالت تعادل}} = \frac{a^2}{18000}$$

و برای حالتی که سطح مقطع نول نصف سیم فاز باشد . $\text{درصد ازدیاد تلفات} = \frac{a^2}{112/5}$

شکل (۱-۲) درصد افزایش تلفات بر حسب افزایش عبور جریان از سیم نول برای دو حالـت ۱ و ۲ نشان می‌دهد.




شکل (۱-۲) : درصد افزایش تلفات برحسب افزایش عبور جریان از سیم نول

**۱-۱-۵- شرایط لازم برای تعادل شبکه علاوه بر یکسان نمودن بار فازها**

بدیهی است که محاسبات انجام شده در حالت ساده شبکه و با فرض همسان بودن مقاطع سیمهای شبکه و ضریب قدرت مساوی در فازها انجام یافته است و در حالی که این دو شرط برقرار نباشد امکان محاسبه با حجم گسترده شبکه حتی با محاسبات کامپیوتری نیز نتیجه قابل قبولی را در بر نخواهد داشت. در اینجا هدف صرفاً نمایشی تقریبی افزایش تلفات انرژی در اثر عدم تعادل بار و زیانهای ناشی از آن می‌باشد که به همین وسیله توجه شرکتهای توزیع را به تعدیل بار فازها معطوف دارد و بنابراین با اندازه‌گیری جریان سیم نول یا جریان سیم‌های فاز میزان تلفات ناشی از نامتعادلی بار را محاسبه و بار مالی آنرا تعیین کند.

ذکر این نکته ضروری است که مساوی کردن بار فازها و متعادل نمودن آن برای صفر کردن یا کاهش جریان نول عملاً بسیار بعید و شاید غیر ممکن است و نیز ضریب قدرت هر فاز تأثیر بسزایی در جریان نول دارد. با این معنی که با متعادل کردن بار فازها زمانی جریان در سیم نول صفر خواهد شد که ضریب قدرت هر سه فاز نیز یکسان باشد. برای روشن نمودن مطلب ذکر یک مثال ضروری است :

- بار فازها متعادل و برابر ۱۰۰ آمپر منظور می‌شود : $I = I_R = I_S = I_T = 100A$

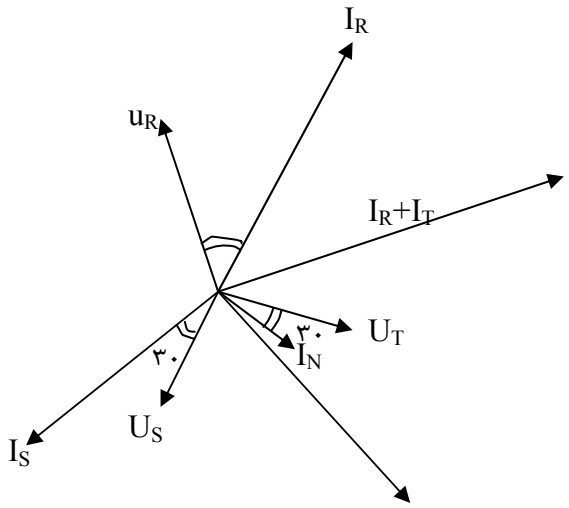
- ضریب قدرت فازها عبارت باشند از: $Cos\phi_R = 0/5 \;\; Cos\phi_S = 0/966 \;\; Cos\phi_T = 0/866$

$\phi_R = 60^o \;\; \phi_S = 15^o \;\; \phi_T = 30^o$

با استفاده از شکل (۱-۳) روابط زیر بدست می‌آید :

$\bar{I}_R + \bar{I}_T = \sqrt{2}\; I$

$\bar{I}_N = \bar{I}_R + \bar{I}_S + \bar{I}_T$




شکل (۱-۳): دیاگرام برداری جهت محاسبه جریان نول

با استفاده از روابط مثلث نامشخص : $I_N = \sqrt{\left(\sqrt{2}I - I\right)^2 + 4\sqrt{2}I^2.Sin(\frac{30^o}{2})} = 74A$

ملاحظه می‌گردد با وجودی که بار هر سه فاز متعادل و مساوی است ، بعلت ضریب قدرتهای مختلف جریان نول صفر نشده است.

در بخش ۲-۱ با فرض داشتن ضریب قدرت یکسان برای سه فاز ، الگوریتمی جهت متعادل کردن بار سه فاز پیشنهاد می‌گردد.

### ۱-۲- اثر نا متعادلی بار در افزایش تلفات ترانسفورماتورهای توزیع

چون اکثر مصرف کنندگان در شبکه‌های فشار ضعیف ، تکفازند اجازه نمی‌دهند که جریان به طور یکسان بین فازها تقسیم شود. علاوه بر این استفاده از منابع تکفاز در برخی از شبکه ها نامتعادلی جریان سه فاز را به دنبال دارد. در بسیاری از کشورها ترانسهای توزیع (MV/LV) تکفازند. طرف اولیه ترانسهای توزیع ، ممکن است بین یک فاز و زمین یا بین دو فاز خطوط فشار متوسط وصل شود. بنابراین در مدارهای سه فاز فشار متوسط ، هم نامتعادلی ولتاژ و هم نامتعادلی جریان می‌تواند ظاهر شود [۱۷]

### ۱-۲-۱- عملکرد نامتعادل ترانسفورماتورهای سه فاز [۶]

در عمل ،باورهای تکفاز مورد نیاز مصرف کننده‌ها همواره از ثانویه‌های ترانسفورماتورهای سه فاز تأمین و تغذیه می‌گردند. اگر چه تلاشی برای متعادل نگه داشتن بارها صورت می‌گیرد ، اما شرایط عدم تعادل ( عدم تقارن) در سیم پیچی‌های فاز یا عدم تعادل در بارهای تکفاز و یا به علت قطبی‌های تک فاز ، باعث می‌شود در شرایط نامتعادل کار کنند.

عملکرد نامتعادل ترانسفورماتورها پدیده‌ای نامطلوب و ناخواسته است و این بدان علت است که جریان‌های نامتعادل در سیم پیچی‌های سه فاز ، اثرات مضری به شرح زیر بر رفتار ترانسفورماتورها به دنبال خواهد داشت.

۱) تلفات هسته و تلفات اهمی افزایش می‌یابد به طوری که کارائی ترانسفورماتور کم می‌شود. علاوه بر این تلفات مذکور باعث ایجاد حرارت بیشتر و نتیجتاً کاهش عمر ترانسفورماتور می‌گردد.

۲) ولتاژهای فاز و خط نامتعادل و از شکل طبیعی خود خارج می‌گردند.

۳) ظرفیت باردهی ترانسفورماتور کاهش می‌یابد.

ولتاژی‌های خط یا فاز نامتعادل ، اثرات زیان آوری برکار وسایل الکتریکی که به این ترانسفورماتورها متصل هستند ، دارند. برای مثال ، کاهش گشتاور راه اندازه‌ای و گشتاور حالت عادی ، کاهش سرعت کار و کارآیی نامطلوب از جمله نتایج عملکرد موتور القائی است که از شبکه نامتعادل تغذیه می‌گردد.

برای بررسی و تحقیق هر چه دقیق‌تر رفتار ترانسفورماتورها تحت شرایط نامتعادل ، باید روش مؤلفه‌های متقارن مورد استفاده قرار گیرد. موضوع و هدف این بخش تجزیه و تحلیل دقیق نیست ، بلکه هدف تنها نشان دادن تصویر تقریبی از رفتار نا متعادل ترانسفورماتورهای سه فاز است.

**۱-۲-۲- بارهای تکفاز روی ترانسفورماتورهای سه فاز**

بارهای تکفاز بین خط و خنثی و یا بین دو خط ترانسفورماتور سه فاز ، بدترین شرایط نامتعادلی را برای ترانسفورماتور مربوط بوجود می‌آروند. علاوه بر این می‌توان ادعا کرد که یک بار چند فاز نامتعادل برابر است با یک بار چند فاز متعادل و یک بار تک فاز بین خط و خنثی و یا بین دو خط ، از این رو ، بررسی رفتار ترانسفورماتورهای سه فاز در مقابل جریانهای تک فاز ، امری ضروری است.

انواع گوناگون اتصال‌های مورد بحث در این بخش ، تعادل نیروی محرکه مغناطیسی در دو طرف ثانویه و اولیه به تعیین جریان سیم پیچ‌ها کمک می‌کند. سیم پیچی اولیه و ثانویه مربوط به یکفاز به طور موازی یکدیگر رسم شده‌اند و برای سادگی ، نسبت تبدیل آنها واحد فرض شده است. در

شکلهای گوناگون فلش‌ها جهت جریان را مشخص می‌کنند و اعداد کنار این فلش ، بزرگی جریان را نشان می‌دهند.

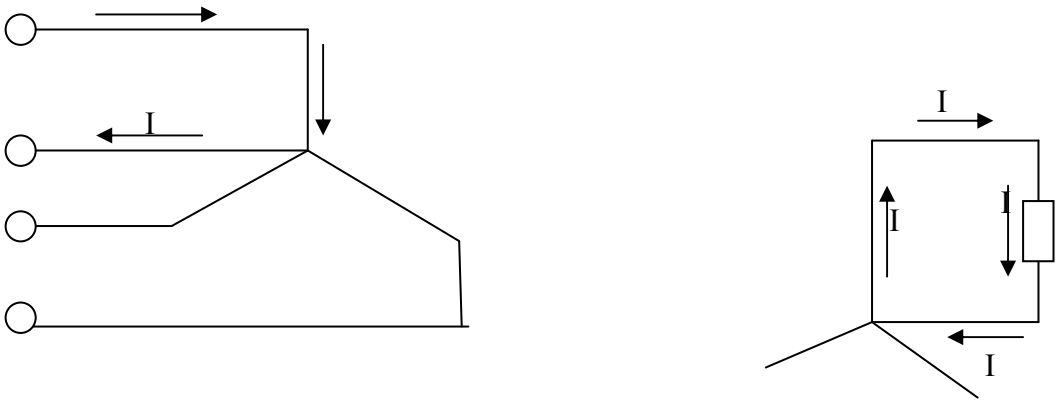
الف ) در شکل ۱-۴ (a) دو سیم پیچی فاز و یک سیم خط ، به گونه‌ای که نشان داده شده ، حامل جریان صفر هستند $\left(I_{AB}=2\right)$. دقت کنید که یک خط طرف اولیه حامل جریان صفر است.

ب ) در شکل ۱-۴ (b) توزیع جریان در یک ترانسفورماتور زیگزاگ ، ستاره (YZ) برای یک بار بین خط و خنثی در طرف ثانویه نشان داده شده است. توجه کنید که برای حفظ تعادل mmf ، جریان طرف اولیه ، نصف جریان طرف ثانویه است.

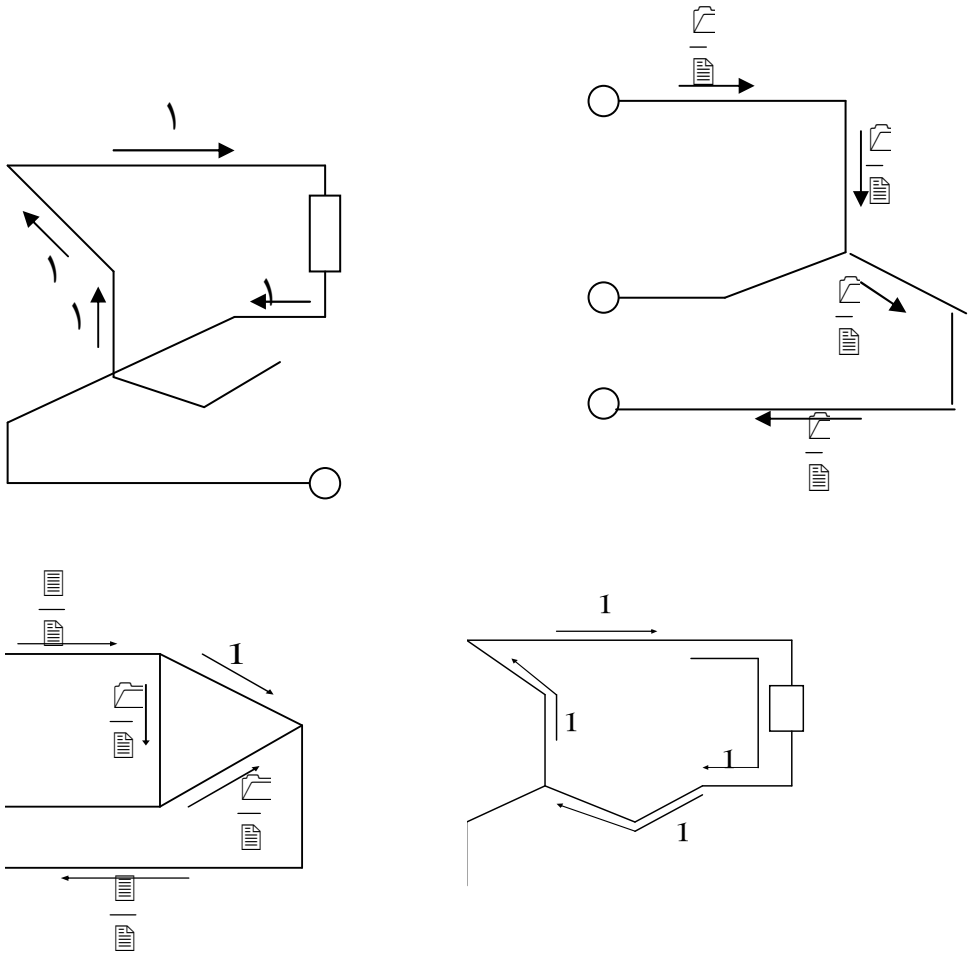
ج) برای اتصال DZ ، بار بین دو خط طرف ثانویه فرض می‌شود. برای حفظ تعادل mmf ، جریانهای فاز در طرف اولیه در شکل ۱-۴ (C) نشان داده شده است. توجه داشته باشید که جریانها در طرف ثانویه ، واحد فرض شده‌اند ، در حالیکه جریان در یک فاز ۱ و جریان $\frac{1}{2}$ در دو فاز دیگر طرف اولیه هستند. جریان خط طرف اولیه عبارت از جریان صفر در یک خط و جریان $\frac{2}{3}$ در دو خط دیگر می‌باشد.

د ) ترانسفورماتورهای سه فاز بدون نقطه خنثی در طرف اولیه ممکن است بتواند یا نتواند بار خط به خنثی را در طرف ثانویه تغذیه کند.

I




a




شکل (۱-۴): بار تکفاز در ترانسفورماتورهای سه فاز

### ۱-۲-۳- بار تکفاز خط به خنثی در ترانسفورماتورهای سه فاز

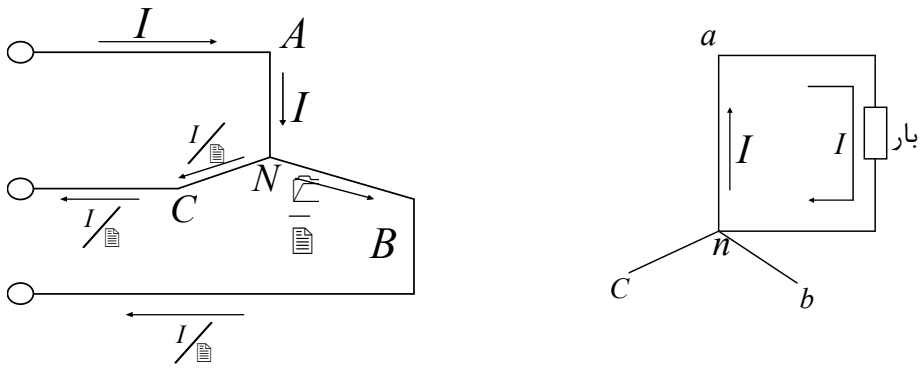
همانگونه که قبلاً بیان شد بار تکفاز به خنثی ، بدترین حالت بارگذاری نامتعادل در ترانسفوماتورهای سه فاز است. در این قسمت این نوع بارگذاری نامتعادل برای ترانسفورماتورهای سه فاز بامدار مغناطیسی مجزا مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

شکل (۱-۵) یک ترانسفورماتور سه فاز با سه مدار مغناطیسی مجزا ، یا اتصال ستاره بدون نقطه خنثی در طرف اولیه را تشریح می‌کند.

به گونه‌ای که در شکل (۱-۵) نشان داده شده است به محض بارگذاری خط به خنثی در طرف ثانویه فاز A ، جریان I از سیم پیچی فاز مربوط به بار عبور می‌کند. برای نسبت تبدیل واحد فازها جریان I به خاطر تعادل mmf در سیم پیچی ثانویه فاز A ، در سیم پیچی اولیه فاز A جریان می‌یابد. این مطلب با رجوع به شکل (۱-۵ (a) ) معلوم و مشخص است. در فاز A بار دار شده باید که نیروهای محرکه مغناطیسی ناشی از جریان ثانویه I جریان اولیه $i_A$ مخالف یکدیگر باشند و از این رو :

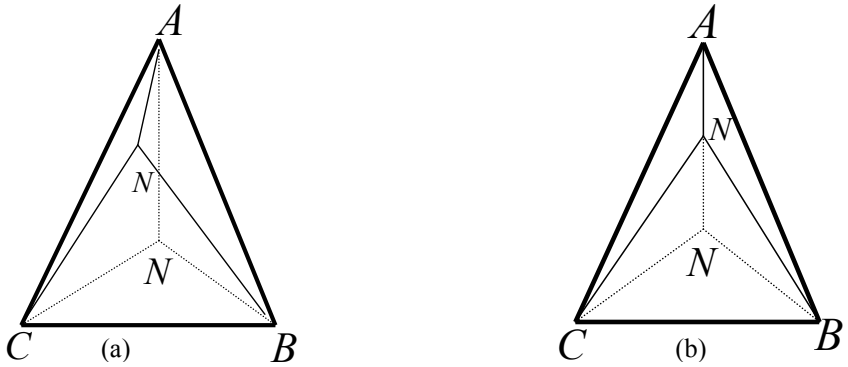
$$i_A N(\text{بالا } mmf) - IN(\text{پائین } mmf) = 0 \qquad \text{یا } i_A = I$$

علاوه بر این باید توجه داشت که جریان فاز A می‌باید از طریق فازهای B و C به منبع برگردد. به عبارت دیگر به گونه ای که در شکل نشان داده شده ، اولیه‌های فازهای B و C مجبورند که جریان $\frac{I}{2}$ را حمل کنند. بنابراین




شکل (۱-۵): بار تکفاز بین خط خنثی در گروه ترانسفورماتور Yy بدون خط خنثی

جریان $\frac{I}{2}$ در اولیه‌های فازهای B و C جریان تحریک [۱] به حساب می آید و نتیجتاً اگر این جریانها به اندازه کافی بزرگ باشند ، باعث اشباع قابل ملاحظه هسته می‌شوند. در نتیجه ولتاژهای زیاد غیر عادئی ( $\frac{I}{\text{📄}}\times$ امپدانس تحریک [۲]فاز B یا C ) در دو سر فازهایB و C ظاهر می‌شوند. بنابراین ولتاژهای خط به خنثی ، مطابق شکل (۱-۶ (a) ) نامتعادل می‌گردند. در این شکل مثلث ABC ولتاژهای خط اولیه و N ، نقطه خنثی نیروهای محرکه اولیه و ثانویه را نشان می‌دهد. از آنجا که فرض می‌شود ترانسفورماتور به یک منبع




[۱] جریان تحریک تنها از یک سیم پیچی جاری می شود و mmf مربوط آن توسط جریان سیم پیچی دیگر به تعادل نمی‌رسد.

[۲] امپدانس تحریک یا امپدانس شنت یک ترانسفورماتور عبارتست از ترکیب موازی ( مقاومت مربوط به تلفات هسته) $\phi, R_C\ X$ ( راکتانس مغناطیسی کننده )

شکل (۱-۶) : بار خط به خنثی فاز A گروه ترانسفورماتور Yy

تغذیه بزرگ وصل است مثلث ولتاژ ABC بدون تغییر می‌ماند. تنها نقطه خنثی است که اثر می‌پذیرد. ولتاژ دو سر فاز A از $V_{AN}$ به $V_{AN}'$ سقوط می‌کند ، در حالیکه ولتاژ دو سرفازهای B و C بترتیب از $V_{BN}$ و $V_{CN}$ به $V_{BN}'$ و $V_{CN}'$ افزایش می‌یابد. اگر $\frac{1}{2}$ در فازهای B و C ، کمتر یا معادل جریانهای تحریکشان باشد ، ولتاژهای فازها متعادل باقی می‌مانند. این بدان معناست که بدون فروپاشی ولتاژ فاز بار شده است و جریان بار تک فاز معادل دو برابر جریان تحریک آن فاز قابل تحویل است. توجه کنید که تنها اگر هر دو ترانسفورماتور B و C دارای جریان تحریک یکسانی باشند نمودار برداری شکل (۱-۶ (a)) صدق می‌کند.

بعنوان مثال طبق شکل (۱-۶(a)) در حالیکه ترانسفوماتور B ، در مقایسه با ترانسفورماتور C ، دارای جریان تحریک کمتری ( مقاومت ظاهری تحریک ) باشد ، ولتاژ ظاهر شده دو سر B از ولتاژ دو سر ترانسفورماتور C بیشتر است.

### ۱-۲-۴- بررسی تلفات نامتعادلی در ترانسهای توزیع

همانطور که در بخشهای گذشته آمده است ، جریان عدم تعادل شبکه فشار ضعیف از سیم پیچ ثانویه عیناً عبور کرده و مشابه خطوط ، تلفات عدم تعادلی را ظاهر می‌سازد. بر حسب نوع سیم‌پیچی ، طرف ثانویه نیز موجب تلفاتی در سمت اولیه ترانس می‌شود که این تلفات برای دو نوع از اتصالات ذکر شده محاسبه می‌گردد.طی دو مثال زیر دو نوع از این اتصالات مورد بررسی قرار می‌گیرد تا میزان افزایش تلفات در حالت نامتعادلی بار نسبت به حالت متعادل بدست آید. در روابط ارائه شده علامتهای اختصاری به شرح زیر می باشند.

$R_{ph}$ : مقاومت سیم پیچهای فاز اولیه و ثانویه

$R_N$ : مقاومت سیم نول

$n_1$ : تعداد دور سیم پیچی طرف اولیه

$n_2$ : تعداد دور سیم‌پیچی طرف ثانویه

$I_1$ : جریان فاز طرف اولیه

$I_2$ : جریان فاز طرف ثانویه

$I_{N1}$ : جریان اضافی ناشی از نامتعادلی ، در طرف اولیه

$I_{N2}$ : جریان نول طرف ثانویه

$P_{LU1}$ : تلفات در حالت نامتعادلی بار در طرف اولیه

$P_{LU2}$ : تلفات در حالت نامتعادلی بار در طرف ثانویه

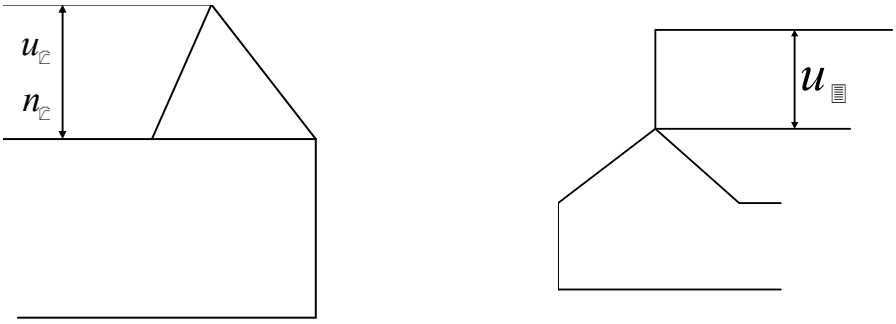
$P_{LUtot}$ : کل تلفات در حالت نامتعادلی بار

$P_{L1}$ : تلفات در طرف اولیه در حالت بار متعادل

$P_{L2}$ : تلفات در طرف ثانویه در حالت بار متعادل

$P_{Ltot}$ : کل تلفات در حالت بار متعادل

مثال ۱: ابتدا اتصال $\Delta Y$ مورد بررسی قرار می‌گیرد ( شکل ۱-۷). فرض می‌شود در حالت تعادل بار ثانویه جریانهای متعادل ۱۰۰ A در هر فاز ترانس جریان دارد ، لذا جریانی از سیم نول نمی‌گذارد. مقدار نسبت تبدیل نیز طبق روابط زیر بدست می آید :



شکل (۱-۷) : ترانسفورماتور $\Delta Y$ با سیم نول

$$u_1 \approx n_1$$

$$\frac{u_2}{\sqrt{3}} \approx n_2 \Rightarrow \frac{n_1}{n_2} = \frac{u_1}{u_2\sqrt{3}} \Rightarrow \frac{n_1}{n_2} = \frac{u_1\sqrt{3}}{u_2} \Rightarrow \frac{u_1}{u_2} = \frac{n_1}{\sqrt{3}n_2}$$

لذا در این نوع اتصال نسبت تبدیل معادل $\frac{n_1}{\sqrt{3n_2}}$ است و جریانها نیز با این نسبت تبدیل به اولیه منتقل می‌شود. در نتیجه جریانهای فاز طرف اولیه برابر است با :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\sqrt{3}n_2}{n}$$

$$I_1 = 100\sqrt{3}\frac{n_2}{n_1}$$

با این فرضیات به محاسبه تلفات می‌پردازیم. تلفات شامل تلفات در سیم پیچی اولـین و تلفـات در سیم پیچی ثانویه است.

$$P_{Ltot} = P_{L1} + P_{L2}$$

$$= 3 \times R_{ph} \times I_1^2 + 3 \times P_{ph} \times I_2^2$$

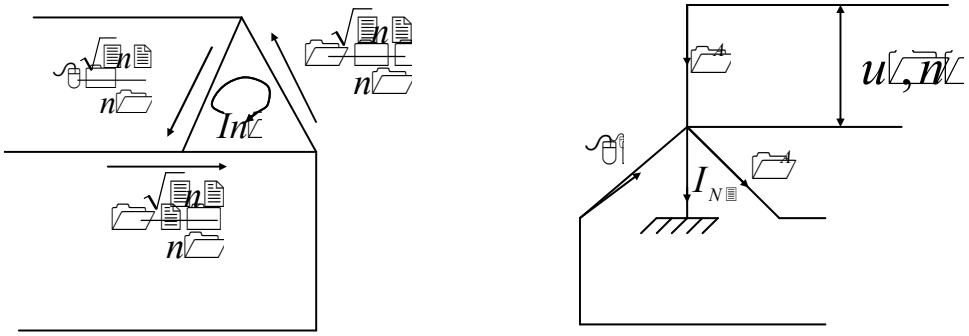
$$= 3R_{ph} \times \left( 100^2 + 3 \times 100^2 (\frac{\sqrt{3}n_2}{n_1})^2 \right)$$

$$= 3 \times 100^2 R_{ph} (1 + 3 \times (\frac{\sqrt{3} n_2}{n_1})^2)$$

در حالت نامتعادل فرض می‌شود که جریانهای فازها به صورت ۱۰۰A ، ۱۲۰A و ۸۰A باشند ، لذا مطابق شکل (۱-۸) روابط ذیل برقرار می‌باشد.

طبق رابطه (۱-۷) داریم : $I_{N2} = \sqrt{(I_R - I_S)^2 + (I_T - I_R)^2} = 20\sqrt{6} \quad A$

$$P_{N1} = I_{N2} \times \frac{\sqrt{3} n_2}{n_1} = 20\sqrt{6} \times \frac{\sqrt{3} n_2}{n_1}$$



شکل (۱-۸): مقادیر جریانها در ترانسفورماتور $\Delta Y$ با سیم نول

$$PL_{u1} = 3 R_{ph} (\frac{\sqrt{3} n_2}{n_1})^2 \times \left(100^2 + 120^2 + 80^2\right) + 3 \times R_{ph} \left(I_{N1}\right)^2$$

$$PL_{u2} = 3 \times R_{ph} \left(100^2 + 120^2 + 80^2\right) + R_N \times \left(I_{N2}\right)^2$$

$$PL_{utot} = 3 \times R_{ph} \times 30800 (1 + \frac{\sqrt{3} n_2}{n_1})^2 + 3 R_{ph} \times 400 \times 6 (\frac{\sqrt{3} n_2}{n_1})^2 + R_N \times 400 \times 6$$

$$= 3 \times 400 R_{ph} \left[ 77 + 83 (\frac{\sqrt{3} n_2}{n_1})^2 \right] + 2400 R_N$$

$$PL_{utot} = 1200 R_{ph} \left[ 77 + 83 (\frac{\sqrt{3} n_2}{n_1})^2 \right] + 2400 R_N$$

$$\Rightarrow \frac{PL_{utot}}{PL_{tot}} \quad \frac{300\left[4R_{ph}(77+83(\frac{\sqrt{3}N_2}{n_1})^2)+8R_N\right]}{300[100R_{ph}(1+(\frac{\sqrt{3}n_2}{n_1})^2)\ ]}$$

$$\Rightarrow \frac{PL_{utot}}{PL_{tot}} \quad \frac{77R_{ph}(1+1/08(\frac{\sqrt{3}n_2}{n_1})^2)+2R_N}{25R_{ph}(1+(\frac{\sqrt{3}n_2}{n_1})^2)}$$

مثال ۲ : در این مثال به بررسی ترانس با اتصال YZ می‌پردازیم ابتدا فرض می‌شود که جریان متعادل ۱۱۰A در هر یک از سیم پیچی‌های ترانس Z جریان دارد ، لذا جریانهای متعادل طرف ثانویه برابر است با :

$$\frac{n_2}{n_1}=\frac{\sqrt{3}u_2}{2u_1}$$

$$\Rightarrow \frac{u_2}{u_1}=\frac{2n_2}{\sqrt{3}n_1} \Rightarrow I_1=110\times\frac{2n_2}{\sqrt{3}n_1}$$

و از آنجا تلفات ناشی از عبور جریانها در سیم پیچهای ترانس برابر است با :

$$PL_1=3\times R_{ph}\times 110^2(\frac{2n_2}{\sqrt{3}n_1})^2$$

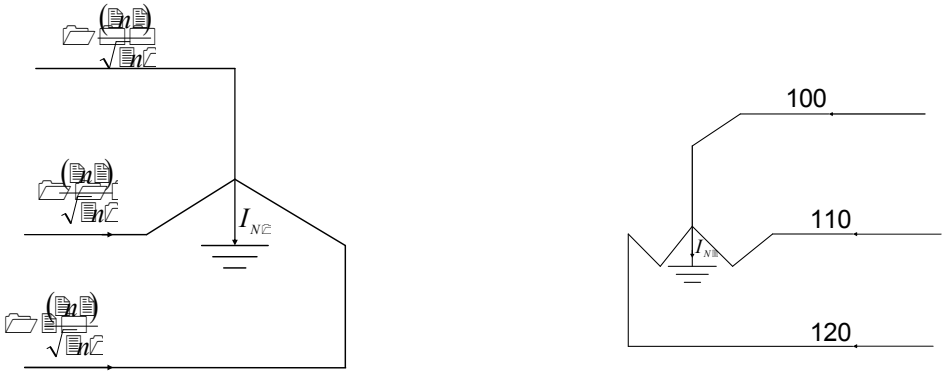
$$PL_2=3\times R_{ph}\times 110^2$$

$$\Rightarrow PL_{tot}=3\times R_{ph}\times 110^2(1+(\frac{2n_2}{\sqrt{3}n_1})^2)$$

حال در حالت نامتعادل فرض می‌شود جریانهای متعادلی ۱۰۰A ، ۱۱۰ A و ۱۲۰A در سیم پیچ‌های ترانس Z جریان داشته باشد ، لذا جریان نول مطابق رابطه (۱-۷) برابر است با :

$$I_{N2} = 10\sqrt{6} \times (\frac{2n_2}{\sqrt{3}n_1})$$

$$PL_{u2} = R_{ph}\left(100^2 + 110^2 + 120^2\right) + R_N \times {I_{N2}}^2$$




شکل (۱-۹) : ترانسفورماتور YZ با سیم نول

$$PL_{u1} = R_{ph}(\frac{2n_2}{\sqrt{3}n_1})\left(100^2 + 110^2 + 120^2\right) + R_N \times {I_{N1}}^2$$

$$PL_{utot} = R_{ph}\left(100^2 + 110^2 + 120^2\right)(1 + (\frac{2n_2}{\sqrt{3}n_1})^2) + R_N \times 100 \times 6(1 + (\frac{2n_2}{\sqrt{3}n_1})^2)$$

$$PL_{utot} = (1 + (\frac{2n_2}{\sqrt{3}n_1})^2) \times \left[100R_{ph}\left(10^2 + 11^2 + 12^2\right) + 600R_N\right]$$

$$PL_{utot} = 100(1 + (\frac{2n_2}{\sqrt{3}n_1})^2) \times \left[365R_{ph} + 6R_N\right]$$

در حالت قبل $PL_{tot} = 100(1 + (\frac{2n_2}{\sqrt{3}n_1})^2) \times \left[363R_{ph}\right]$

$$\Rightarrow \frac{PL_{utot}}{PL_{tot}} = \frac{365\ R_{ph} + 6R_N}{363\ R_{ph}}$$

با جایگذاری $R_N, R_{ph}$ و $\frac{n_2}{n_1}$ در این روابط تلفات انرژی در حالت نامتعادلی ترانس قابل محاسبه می‌باشد. چنانچه ملاحظه می‌گردد این تلفات مقدار قابل توجهی بوده و می‌بایستی نسبت به کاهش آن اقدام مناسبی به عمل آید.

**۱-۲-۵- ارائه پیشنهاد جهت کم کردن تلفات نامتعادلی در ترانسفورماتورهای توزیع**

۱- بالانس کردن بار خروجیهای ترانس طبق الگوریتم پیشنهاد شده در بخش ۲-۱

۲- دادن کد یا شماره مخصوص به هر ترانس و تشکیل پرونده جداگانه هر ترانس به طوریکه پس از رکورد دیگری سالانه ( در موقع پیک بار ) مقدار آمپراژ هر فاز در این پرونده نوشته شود و در صورت اضافه شدن مشترک جدید آمپر آن به این آمار اضافه گردد.

۳- پس از رکوردگیری در صورت بالا بودن درصد بار ترانس ، اقدام به تعویض ترانس با ترانسی با ظرفیت بالاتر و در غیر این صورت مجبور به تفکیک شبکه و اضافه نمودن یک ترانس دیگر به شبکه.

۴- استفاده از مانور تغییر تپ در ترانسها ( توزیع و قدرت ) بطوریکه در صورت لزوم در تابستان تپهای ترانس افزایش و در زمستان کاهش یابد.

# « فصل دوم »

# بررسی روش‌های کاهش تلفات ناشی از نامتعادلی بار

## ۲-۱- ارائه الگوریتم جهت تعادل بار فازها

همانطور که در بخش نخست اشاره شد ، یکی از مشکلات اساسی که در شبکه های توزیع وجود دارد ، عدم توزیع مناسب بارهای تکفاز و به تبع آن تلفات از نامتعادلی بارهاست. این تلفات شامل دو قسمت تلفات نول و تلفات نامتعادلی در فازها می‌شود.

از آنجا که بحث متعادل کردن فاز و تصحیح ضریب قدرت بارهای نامتقارن ، بحثی مجزا بوده و در اکثر کتب و مقالات یافت می‌شود [۱۰] ، لذا با فرض ضریب قدرت یکسان برای سه فاز ، به سراغ روشی می‌رویم تا بتوان توسط آن بار سه فاز را متعادل ساخت.

در این فصل الگوریتمی ارائه می‌گردد که توسط آن توزیع بهینه بارهای تکفاز به منظور دسترسی به کمترین تلفات ناشی از نامتعادلی بار بدست آید. هدف از ارائه این الگوریتم در اختیار داشتن ابزاری جهت نیل به مقصود فوق می‌باشد. در طرح این الگوریتم با دو مسأله مجزا از یکدیگر مواجه می‌شویم ک

حالت اول آنستکه برای شرکت توزیع از نظر اجرائی قابلیت تغییر انشعابهای روی هر گره وجود داشته و در صدد کمینه کردن تلفات ناشی از نامتعادلی بار در شبکه باشد. در این صورت مطابق با الگوریتم ارائه شده در بخش ۲-۱-۵ آرایش جدید شبکه با کمترین ناشی از نامتعادلی قابل دستیابی است.

در حال دوم ، اگر شرکت توزیع در جهت تغییر انشعابها محدودیتهای اجرائی داشته باشد و درصدد تخصیص انشعاب جدید باشد ، این الگوریتم مطابق با روشی که بعداً توضیح داده خواهد شد که

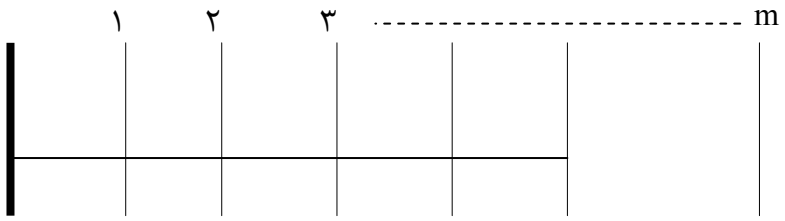
مبتنی بر استفاده از روش سعی و خطا برای رسیدن به حالت بهینه با شرایط موجود شبکه می‌باشد ، بهترین حالت تخصیص انشعاب را در اختیار قرار می‌دهد.

البته توصیه می‌شود که شرکتهای توزیع در صورتیکه مشکلات اجرائی از نظر بی برقی فیدرهای توزیع را نداشته باشند ، شبکه موجود را با استفاده از الگوریتم ارائه شده برای یکبار تغییر آرایش دهند تا توزیع بهینه بار در فیدر فشار ضعیف بدست آید.

**۲-۱-۱- اساس روش**

در طرح این الگوریتم یک تابع هدف در نظر گرفته می‌شود که مبین تلفات از نامتعادلی بار است و سعی می‌گردد این تابع به حداقل مقدار خود برسد.

شکل (۲-۱) در نظر گرفته می‌شود شبکه نشان داده شده در این شکل یک شبکه شعاعی بوده و از یک سو تغذیه شده است این شبکه دارای m گره بوده و تعداد انشعابهای روی هر فاز در هر گره $n_{R1}$ الی $n_{S1}, n_{Rm}$ الی $n_{Sm}$ و $n_{T1}$ الی $n_{Tm}$ می‌باشد که به طور مجزا نشان داده شده است.




$n_{R1}$ $n_{R2}$ $n_{R3}$ ---------- $n_{Rm}$

$n_{S1}$ $n_{S2}$ $n_{S3}$ ---------- $n_{Sm}$

$n_{T1}$ $n_{T2}$ $n_{T3}$ ---------- $n_{Tm}$

شکل (۲-۱) : شبکه شعاعی از یکسو تغذیه

در شبکه فوق فرض می‌شود همه انشعابها دارای مصارف یکسان و برابر I باشند ، ضمناً ضریب قدرت همه نیز یکسان فرض می‌شود تا بتوان از روابط استخراج شده در بخش قبل استفاده کرد.

یکی دیگر از فرضیات اساسی ، ثابت بودن مجموع انشعابهای سه فاز روی هر گره می‌باشد. بعبارت دیگر بهینه سازی فنی با تغییر انشعابهای سه فاز روی یک گره انجام می‌شود و امکان تغییر تغذیه بار از یک گره به گره دیگر وجود ندارد. بدین ترتیب خواهیم داشت :

جریان فاز R در گره Kام $I_{R_k} = i \times n_{R_k}$

(۲-۱) جریان فاز S در گره Kام $I_{S_k} = i \times n_{S_k}$

جریان فاز T در گره Kام $I_{T_k} = i \times n_{T_k}$

با توجه به شکل (۲-۲) جریانهای فاز شاخه‌های شبکه به شرح زیر می‌باشد :

| ۱ | ۲ | ۳ | ..... | m |
|---|---|---|---|---|
| $J_{R1}$ | $J_{R2}$ | | | $J_{Rm}$ |
| $J_{S1}$ | $J_{S2}$ | | | $J_{Sm}$ |
| $J_{T1}$ | $J_{T2}$ | | | $J_{Tm}$ |
| | | | | |

شکل (۲-۲): جریانهای فاز در شبکه شعاعی

$J_{R_m} = I_{R_m}$ ..... $J_{R1} = \sum_{i=1}^{m} I_{Ri}$

$J_{S_m} = I_{S_m}$ ..... $J_{S1} = \sum_{i=1}^{m} I_{S\,i}$

$J_{T_m} = I_{T_m}$ ..... $J_{T1} = \sum_{i=1}^{m} I_{T\,i}$

با توجه به روابط ارائه شده در بالا و فرض یکسان بودن انشعابها (I) می‌توان نتیجه گرفت که :

$$J_{R_k} = \sum_{L=k}^{m} n_{R\,L} \times i$$

$$J_{S_k} = \sum_{L=k}^{m} n_S \times i \qquad (۲-۳)$$

$$J_{T_k} = \sum_{L=k}^{m} n_{T\,L} \times i$$

اگر $J_{R_L} = N_{R_L}$ فرض شود :

$$N_{R_L} \times i = i \times \sum_{L=k}^{m} n_{S_L} \times n_{R_L} \qquad (۲-۴)$$

لذا نتیجه می‌شود که :

$$N_{R_L} = i \times \sum_{L=k}^{m} n_{R_l} \qquad (۲-۵)$$

به عبارت دیگر :

$$N_{R_m} = n_{R_m} \quad \ldots\ldots\ldots \quad N_{R2} = N_{R3} + n_{R2} \quad , \quad N_{R1} = \sum_{k=1}^{m} n_{R_K}$$

$$N_{S_m} = n_{S_m} \quad \ldots\ldots\ldots \quad N_{S2} = N_{S3} + n_{S2} \quad , \quad N_{T1} = \sum_{k=1}^{m} n_{S_K} \qquad (۲-۶)$$

$$N_{T_m} = n_{T_m} \quad \ldots\ldots\ldots \quad N_{T2} = N_{T3} + n_{T2} \quad , \quad N_{T1} = \sum_{k=1}^{m} n_{T_K}$$

با توجه به شکل (۲-۲) ملاحظه می‌شود که جریانهای نامتعادلی گره K ، بر جریانهـای نامتعـادلی گره‌های از ۱ تا ۱-k تأثیر می‌گذارد.

حال به استخراج تابع هدف می‌پردازیم ک

با توجه به روابط (۱-۶) و (۱-۷) تلفات کل ناشی از نامتعادلی بار در شبکه به شرح زیر است :

$$PL_{tot}^{\ 1} = \sum_{k=1}^{m} (\frac{R_N}{2} + \frac{R_{ph}}{9}) \left[ \left( J_{R_K} - J_{R_K} \right)^2 + \left( J_{R_K} - J_{T_K} \right)^2 + \left( J_{S_K} - J_{T_K} \right)^2 \right] \quad (۲-۷)$$

از آنجائیکه $R_N$ ( مقاومت سیم نول ) و $R_{ph}$ ( مقاومت سیم فاز) ثابت‌اند ، برای کمینه کردن $PL_{tot}$ باید عبارت داخل پرانتز دوم کمینه شود.

بدین منظور اگر عبارت فوق را A بنامیم ، داریم :

$$A = \left( J_{R_K} - J_{S_K} \right)^2 + \left( J_{R_K} - J_{T_K} \right)^2 + \left( J_{S_K} - J_{T_K} \right)^2 \quad (۲-۸)$$

با توجه به روابط (۲-۳) و (۲-۴) خواهیم داشت :

$$A = \sum_{k=1}^{m} \left( N_{R_K} - N_{S_K} \right)^2 + \left( N_{R_K} - N_{T_K} \right)^2 + \left( N_{S_K} - N_{T_K} \right)^2 \times i^2 \quad (۲-۹)$$

به فرض ثابت بودن جریان I به عبارت $A'$ می‌رسیم ک

$$A' = \left( N_{R_K} - N_{S_K} \right)^2 + \left( N_{R_K} - N_{T_K} \right)^2 + \left( N_{S_K} - N_{T_K} \right)^2 \quad (۲-۱۰)$$

به اینصورت تابع هدف به شکل زیر حاصل می‌گردد :

$$f = \sum_{k=1}^{m} \left[ \left( N_{R_K} - N_{S_K} \right)^2 + \left( N_{R_K} - N_{T_K} \right)^2 + \left( N_{S_K} - N_{T_K} \right)^2 \right] \quad (۲-۱۱)$$

با توجه به روابط بالا با حذف جریانهای انشعابها و منظور کردن تعداد انشعابها به جای آنها ، شکل (۲-۳) به صورت زیر در می آید :

| ۱ | ۲ | ۳ | | m |
|---|---|---|---|---|
| $N_{R1}$ | $N_{R2}$ | | | $N_{Rm}$ |
| $N_{S1}$ | $N_{S2}$ | | | $N_{Sm}$ |
| $N_{T1}$ | $N_{T2}$ | | | $N_{Tm}$ |

$$\begin{cases} n_{R1} \\ n_{S1} \\ n_{T1} \end{cases} \qquad \begin{cases} n_{R2} \\ n_{S2} \\ n_{T2} \end{cases} \qquad \begin{cases} n_{R3} \\ n_{S3} \\ n_{T3} \end{cases} \qquad \begin{cases} n_{R_m} \\ n_{R_m} \\ n_{T_m} \end{cases}$$

شکل (۲-۳): شبکه شعاعی با در نظر گرفتن تعداد انشعابها به جای جریان آنها

$$N_{R_i} = \sum_{k=1}^{m} n_{R_K} \qquad N_{R2} = n_{R2} + N_{R3} \qquad N_{R_m} = n_{R_m}$$

$$J_{S_i} = \sum_{k=1}^{m} n_{S_K} \qquad N_{R2} = n_{R2} + N_{R3} \qquad N_{S_m} = n_{S_m}$$

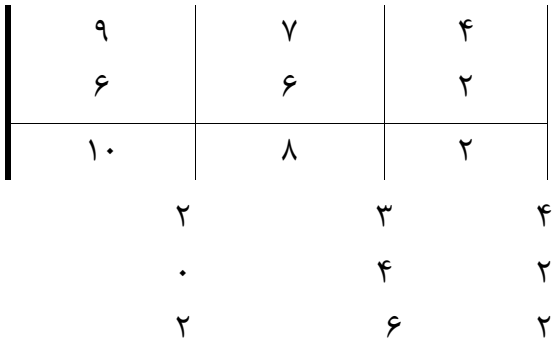
$$J_{T_i} = \sum_{k=1}^{m} n_{T_m} \qquad N_{T2} = n_{T2} + N_{T3} \qquad N_{T_m} = n_{T_m}$$

برای کمینه کردن تابع هدف سعی می‌شود که هر یک از تفاضلهای $\left(N_{R_K} - N_{S_K}\right)$ ، $\left(N_{T_K} - N_{R_K}\right)$ و $\left(N_{S_K} = N_{T_K}\right)$ صفر و یا حداکثر یک باشد بنابراین هر یک از عبارت داخل نماد مجموع $(\sum)$ صفر و یا ۲ می‌باشد اگر $N_{T_K}, N_{R_K}, N_{S_K}$ هر سه مساوی باشند عبارت صفر است و در غیر اینصورت همواره دو مقدار مساوی یکدیگرند و سومی یک واحد بیشتر یا یک واحد کمتر از آن دو است که در اینصورت مقدار

عبارت برابر ۲ می‌شود. این موضوع طی مثالی در بخش زیر تشریح می‌گردد.

### ۲-۱-۲- تعیین آرایش بهینه شبکه

شبکه‌ای با سه گره و تعداد انشعابهایی که روی شکل (۲-۴) نشان داده شده است ، در نظر گرفته می‌شود.




شکل (۲-۴) : شبکه شعاعی از یکسو تغذیه با سه گره

مقادیر $N_{R_K}$ و $N_{S_K}$ و $N_{T_K}$ نیز روی شکل مشخص است.

در حالت اول ، آرایش بهینه شبکه را بدست می آوریم و حالت دوم انشعاب جدید را بدون تغییر شبکه به حالت بهینه ، وارد می‌کنیم.

به عنوان قدم اول برای متعادل کردن شبکه ، می‌توان هم از سمت منبع و هم سمت آخرین گره نسبت به منبع شروع کرد. اگر از آخرین گره شروع کنیم خواهیم داشت :

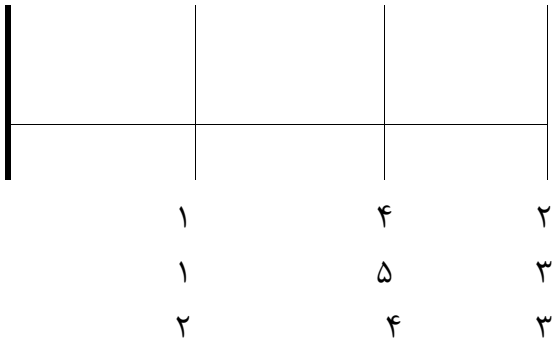
$$n_{R3} = 4$$

$$N_{S3} = 2$$

$$N_{T3} = 2$$

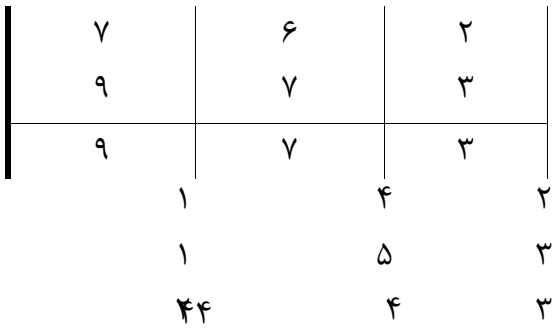
برای متعادل کردن این گره ، مجموع انشعابهای روی این گره را بدست مـی‌آوریـم. حاصـل جمـع مضربی از ۳ ( ۳k) یا مضربی از ۳ باضافه یک (۳k+۱) و یا مضربی از ۳ باضافه ۲ ( ۳k+۲) می‌باشد. در حالت اول یعنی اگر حاصل جمع ۳k باشد به هر فـاز k انشـعاب تخصـیص داده مـی‌شـود. اگـر حاصل جمع (۳k+۱) باشد به یک فاز (k+۱) انشعاب و دو فاز دیگـر ، هـر کـدام (k) انشـعاب داده می‌شود ، و اگر حاصلجمع (۳k+۲) باشد به دوفاز هر کـدام (k+۱) و بـه فـاز آخـر k انشـعاب داده می‌شود. تخصیص این انشعابها به هر فاز در قدم اول به طور تصادفی بوده ولی هر چه که به سـوی بهینه شدن پیش می رویم ، تخصیص آنها تصحیح می‌شود.

در مثال فوق ، در گره ۳ جمع انشعابها ۸ یعنی (۲+۲×۳) می‌باشد. پـس بـه فـاز R ، ۲ انشـعاب و فازهای S و T هر کدام ۳ انشعاب داده می‌شود. به همین ترتیب در گـره‌هـای ۲ و ۱ نیـز انشـعابها متعادل می‌گردد و شبکه به شکل زیر در می‌آید.




شکل (۲-۵): متعادل سازی انشعابها درگره ها

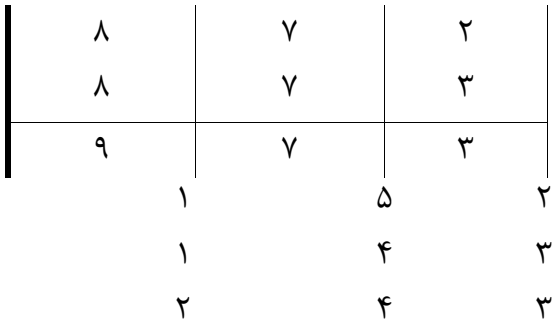
سپس $N_{R_K}$ ها و $N_{S_K}$ ها و $N_{T_K}$ ها را نیز محاسبه می‌کنیم ،شکل‌کلی شبکه بصورت زیر است:



شک (۲-۶): مجموع انشعابهای فازها پس از متعادل سازی انشعابهای گره‌ها

$N_{R_K}$ ها و $N_{S_K}$ ها و $N_{T_K}$ ها را در هر بخش با همان استدلال و روش ذکر شده که در گره‌ها به کار بردیم متعادل می‌کنیم و در صورت نیاز به تغییر تعداد انشعابهای فازهای T,S,R در آن گره ، به منظور برقراری شروط $N_{R3} = n_{R3}, N_{R2} = n_{R2} + N_{R3}$ ( برای فازهای T,S روابط عیناً برقرار است ) آن تغییرات را اعمال می‌کنیم.

بنابراین شکل شبکه به صورت زیر در خواهد آمد :




شکل (۲-۷): متعادل سازی مجموع انشعابهای فازها

در اینحالت تابع هدف برابر است با :

$$f_2 = [\ ((2-3)^2 + (3+3)^2 + (2-3)^2) + ((7-7)^2 + (7-7)^2 + (7-7)^2)) + (((9-8)^2 + (9-8)^2 + (8-8)^2\ ] = 4$$

در حالیکه قبل از اعمال روش فوق تابع هدف برابر بود با :

$$f_1 = \lfloor((4-2)^2 + (2-2)^2 + (4-2)^2) + ((7-6)^2 + (7-8)^2)) + (((9-8)^2 + (9-6)^2 + (6-10)^2 + (10-9)^2)\rfloor = 40$$

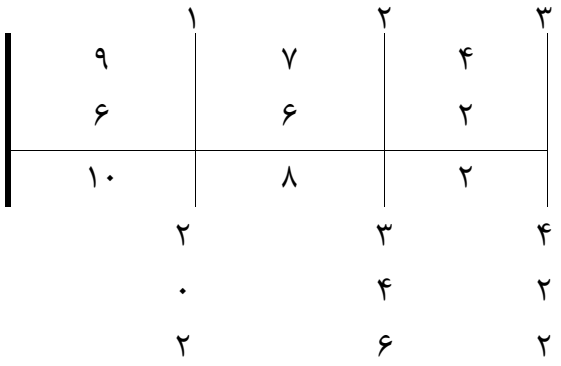
همانطورکه ملاحظه می‌شوددرحالتیکه شبکه بهینه شده است ، مقادیرداخل پرانترها یعنی $N_{R_K}$)

$(N_{T_K} - N_{S_K}), (N_{R_K} - N_{T_K}), N_S)$ یا صفر و یا یک می‌باشد ( به دلیلی که در قسمت (۲-۱-۱) گفته شد ) لذا مقادیر تابع هدف برای هر بخش یا صفر و یا دو می‌باشد.

با توجه به این مطلب و مقادیر بدست آمده در مثال فوق ، یقین حاصل می‌شود که تابع هدف کمینه شده است. در حالت بعد فرض می‌شود که شرکت توزیع امکان تغییر شکل شبکه به حالت بهینه را نداشته باشد و بخواهد یک انشعاب جدید به یکی از گره‌ها وارد کند. مبنای روش بر سعی و خطا استوار است ، به این معنا که در هر بار اضافه کردن انشعاب روی یک فاز یک گره ، مقدار تابع هدف محاسبه شده و فازی که در آن تابع هدف کمترین باشد انتخاب می‌شود. مثال زیر این مطلب را به خوبی تشریح می‌کند.

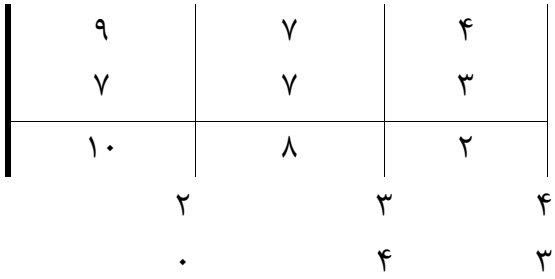
### ۲-۱-۳- تخصیص انشعاب جدید بدون تغییر آرایش شبکه

شبکه مثال (۲-۱-۲) را در نظر گرفته و فرض می‌شود بخواهیم یک انشعاب روی گره ۳ وارد کنیم. با روش سعی و خطا خواهیم دید که کدام فاز بهترین شرایط را از نظر کمینه بودن تابع هدف دارد.



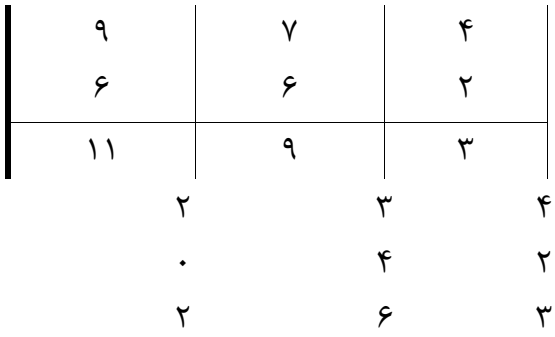

شکل (۲-۸) : شبکه مثال (۱)

بین سه فاز T,S,R به نظر می‌رسد که فازهای T,S ارجح است. ابتدا فاز S را انتخاب می‌کنیم ، یک انشعاب به آن اضافه کرده و حاصل ۳=۱+۲ خواهد بود. تأثیر آن روی انشعابهای گره‌های دیگـر در شکل مشخص است.



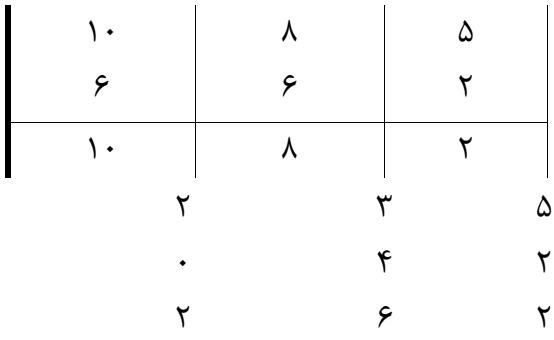

شکل (۲-۹) : شبکه پس از تخصیص انشعاب جدید به فاز S در گره سوم

اگر انشعاب جدید را به فاز T در گره سوم بدهیم ، نتیجه زیر بدست می آید :




شکل (۲-۱۰) : شبکه پس از تخصیص انشعاب جدید به فاز T در گره سوم

و بالاخره اگر انشعاب جدید را به فاز R در گره مذکور دهیم :




شکل (۲-۱۱): شبکه پس از تخصیص انشعاب جدید به فاز R در گره سوم

همانطور که ملاحظه می‌شود ، تابع هدف در حالتیکه به فـاز S یـک انشـعاب بـدهیم ، نسـبت بـه فازهای دیگر مقدار کمتری دارد.

همچنین اگر چه در نظر اول فاز T بر فاز R برتری دارد ، ولی پـس از محاسـبه تـابع هـدف دیـده می‌شود که عکس این مطلب برقرار است ، چرا که مجموع انشعابهای روی فاز T از R در گـره اول بزرگتر است.

یعنی $(N_{T1} > N_{R1})$

حال اگر بخواهیم در گره ۲ یک انشعاب جدید وارد کنیم ، به نظر می‌رسد فاز R از همـه مناسـبتر است. شکل شبکه پس از افزودن انشعاب به قرار زیر است :

| | | |
|---|---|---|
| ۱۰ | ۸ | ۴ |
| ۶ | ۶ | ۲ |
| ۱۰ | ۸ | ۲ |

$\Longrightarrow f = ۴۸$

۴
۴
۶

شکل (۲-۱۲): شبکه پس از تخصیص انشعاب جدید به فاز R در گره دوم

اما اگر انشعاب جدید را به فاز S وارد کنیم خواهیم داشت :

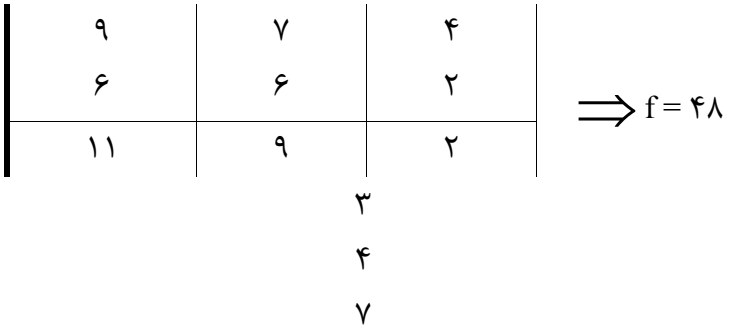
| | | |
|---|---|---|
| ۹ | ۷ | ۴ |
| ۷ | ۷ | ۲ |
| ۱۰ | ۸ | ۲ |

$\Longrightarrow f = ۲۷$

۳
۵
۶

شکل (۲-۱۳) : شبکه پس از تخصیص انشعاب جدید به فاز S درگره دوم

و بالاخره اگر یک انشعاب به فاز T داده شود :




شکل (۲-۱۴): شبکه پس از تخصیص انشعاب جدید به فاز T در گره دوم

پس افزودن انشعاب به فاز S بهتر از بقیه حالات است.

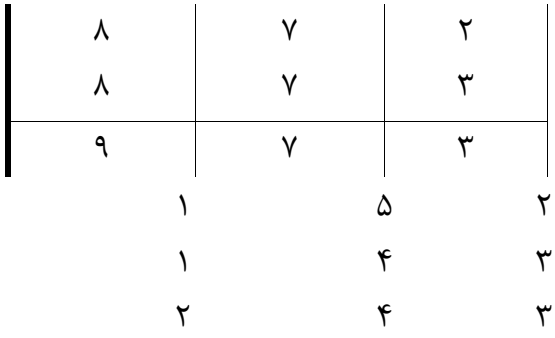
و بالاخره اگر به گره ۱ یک انشعاب وارد شود ، خواهیم دید که فاز S در اینحالت نیز ، بهترین فاز برای افزودن انشعاب است. با دنبال کردن همین روش ، می‌توان انشعابهای بیشتری به گره‌ها وارد نمود.

با توجه به مثالهای بالا و روش بکار برده شده ، اساس الگوریتم براین است که پس از هر بار انتخاب فاز و افزودن یک انشعاب به آن ، تابع هدف محاسبه می‌گردد. اگر ازمقدار تابع هدف در حالت قبل بیشتر بود ، آن فاز رد می‌شود و اگر کمتر بود ، فاز قبلی را حذف کرده و با مقدار تابع هدف فاز بعدی مقایسه می‌شود و هر کدام که کمتر بود آن فاز انتخاب می‌شود.

حالت سومی که ممکن است پیش بیاید اینست که شرکت توزیع امکان تغییر شکل شبکه به حالت بهینه را داشته باشد و پس از بهینه کردن شبکه ، بخواهد انشعابی به یکی از گره‌ها وارد کند. روش بکار رفته شده در این قسمت از الگوریتم را در مثال زیر تشریح می‌کنیم.

### ۲-۱-۴- تخصیص انشعاب جدید به شبکه بهینه شده

همان شبکه مثال اول را که در انتها بهینه شد در نظر گرفته و فرض می‌شود که بخواهیم به گره ۳ دو انشعاب وارد کنیم. انشعابها را یکی یکی وارد می‌کنیم.




شکل (۲-۱۵) : شبکه بهینه شده مثال ۲

اساس الگوریتم در این قسمت اینست که در گره ۳ مجموع انشعابهای روی گره ۳ را محاسبه می‌نمائیم این مجموع برابر ۸ است. یعنی به صورت ۳k+۲ (۳×۲+۲). اگر در گره‌ای مجموع انشعابها ۳k+۲ بود به فازی که کمترین انشعاب را دارد یک انشعاب اضافه می‌کنیم. در این مثال به فاز R یکی اضافه شده در مجموع انشعابهایش به ۳=۱+۲ می‌رسد. حال اگر تأثیر این افزایش را در $N_R$ های گره‌های قبلی ببینیم مشاهده می‌شود که اختلاف Nها در هر بخش هنوز ی و یا صفر است لذا ، اولاً حالت بهینه حفظ شده است و ثانیاً این حالت نسبت به افزایش انشعاب در فازهای دیگر ، بهترین است.