شرکت مدیریت تولید ، انتقال و توزیع نیروی برق

توانیر

تاریخ ویرایش : ۸۸/۰۲/۲۶

دستورالعمل متعادل نمودن بار فازها در شبکه‌های توزیع

مقام تصویب کننده : مدیر عامل شرکت توانیر

دریافت کننده سند جهت اجرا:

- **معاونت هماهنگی توزیع** ☐
- **شرکت‌های توزیع نیروی برق کشور** ☐

تهیه کننده: معاونت هماهنگی توزیع ــ دفتر پشتیبانی فنی توزیع ــ کمیته تخصصی تعیین و کاهش تلفات

ویرایش: ۰۱

اردیبهشت ماه ۱۳۸۸

سایت دفتر پشتیبانی فنی توزیع: www.Tavanir.org.ir/de

تهیه کننده:	تایید کننده:	تصویب کننده:
امضاء	امضاء	امضاء

فهرست مطالب صفحه

مقدمه ۲

۱- هدف ۳

۲- محدوده اجرا ۳

۳- مهارت، ابزار و تجهیزات ۳

٤- دستور انجام کار ۳

٤-۱- تعریف عدم تعادل ۳

٤-۲- تعادل بار در فیدرهای فشار ضعیف ۴

٤-۳- گردش کار الصاق برچسب فاز تغذیه بر روی کنتورهای مشترکین تکفاز ۶

٤-٤- تخمین تلفات ناشی از عدم تعادل روی فیدر فشار ضعیف ۸

٤-٤-۱- روش اول ۸

٤-٤-۲- روش دوم ۸

٤-٥- تحلیل اقتصادی کاهش تلفات ناشی از تعادل بار ۱۱

٤-٥-۱- سود حاصل از تعادل بار ۱۱

٤-٥-۲- هزینه تعادل بار ۱۲

٤-٥-۳- اولویت بندی طرح ها و محاسبه سود به هزینه ۱۲

مراجع ۱۳

ضمیمه ها ۱٤

ضمیمه ۱: تلفات و جریان های فازهای متفاوت ۱۴

ضمیمه ۲: ازدیاد تلفات ناشی از عدم تعادل در ترانسفورمر توزیع ۱۵

ضمیمه ۳: توالی های مثبت، منفی و صفر جریان خط و جریان نول به ازای بارهای تکفاز متفاوت ۱۶

ضمیمه ٤: اعضای کمیته تعیین و کاهش تلفات – متعادل نمودن بار فازها در شبکه‌های توزیع ۱۷

مقدمه

بررسی میزان تلفات الکتریکی در برقرسانی طی سال‌های گذشته، حرکت افزایشی آنرا نشان می‌دهد. بخـش عمـده ایـن تلفـات در صنعت برق، مربوط به بخش توزیع است. از این رو مطالعه و اجرای راه‌کارهای کوتاه مدت کاهش تلفات، یکی از قدم‌های مفیـد در این زمینه می‌باشد. تلفات در شبکه‌های توزیع، بنا به ماهیت به دو دسته تقسیم می‌شود:

- تلفات فنی
- تلفات غیر فنی

تلفات فنی، تلفاتی است که به دلیل ماهیت سیستم برقرسانی به وجود می‌آید، از قبیل:

- تلفات اهمی
- تلفات عایقی
- تلفات هسته ترانسفورماتور و غیره

راه‌کارهای کوتاه مدت برای کاهش تلفات فنی به دو دسته زیر تقسیم می‌شوند:

۱- راه‌کارهای کم هزینه

۲- راه‌کارهای هزینه‌بر

تعادل بار در فیدرهای توزیع، یکی از راه‌کارهای کوتاه مدت کاهش تلفات فنی به شمار مـی‌آیـد. ایـن راهکـار در اکثـر مـوارد جـزو راهکارهای کم هزینه به شمار می‌رود.

این دستورالعمل به تشریح چگونگی انجام مطالعات، اجرا و ارزیابی نتایج در طول دوره ۱ تا حداکثر ۲ ساله برای راهکار تعادل بار در شبکه‌های توزیع می‌پردازد.

۱- هدف

هدف از این دستورالعمل انجام مطـالعات،اجرا و ارزیابی کوتاه مدت تعیین و کاهش تلفات الکتریکی ناشی از عدم تعـادل بـار در شبکه‌های توزیع مطـابق با روشی مدون و معـیارهای معتبر می‌باشد به نحوی که کاهش مستمر تلفات و آزادسازی ظرفیـت تـا دستیابی به تلفات الکتریکی اقتصادی شبکه توزیع صورت پذیرد.

۲- محدوده اجرا

محدوده اجرا از پست‌های فوق توزیع تا انشعاب مشترکین می‌باشد. این دستورالعمل مشتمل بر انجام مطالعات، انجـام فعالیـت-های کاهش تلفات و ارزیابی آنها در شرکت توزیع، امور، محدوده جغرافیایی، فیدر توزیع یا بخشی از شبکه توزیع می‌باشد.

۳- مهارت، ابزار و تجهیزات

برداشت اطلاعات استاتیکی شبکه برای انجام این دستورالعمل باید بر اساس "مجموعه مستندات سیستم اطلاعـات جغرافیـایی (GIS) توزیع" ابلاغی توانیر صورت پذیرد.

٤- دستور انجام کار

از آنجاییکه منشاء نامتعادلی بار اکثرا در فیدرهای فشار ضعیف و بارهای تکفاز است، انجام مطالعـات و اجـرای تعـادل بـار روی اینگونه فیدرها توصیه می‌گردد. در ادامه به تعریف و ارایه دستور انجام تعادل بار در شبکه‌های توزیع می‌پردازیم.

٤-۱- تعریف عدم تعادل

طبق استاندارد IEC61000-2-2 (2002) صفحه ۱۹ میزان عدم تعادل به صورت زیر تعریف می‌شود [۱].

$$Unbalance = \frac{I_2}{I_1}$$

که در این رابطه:

I_2: مقدار موثر توالی منفی مولفه اصلی ولتاژ یا جریان.

I_1: مقدار موثر توالی مثبت مولفه اصلی ولتاژ یا جریان.

در استاندارد مذکور، تعریف عدم تعادل برای ولتاژ بکار رفته است و در این دسـتورالعمل، همـان تعریـف بـرای جریان نیز بکار می‌رود. توالی‌های مختلف به صورت زیر قابل محاسبه هستند.

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \qquad a = e^{j120^0}$$

که در این رابطه:

I_A، I_B، I_C: مقدار موثر جریان مولفه اصلی ولتاژ یا جریان.

I_0: مقدار موثر توالی صفر مولفه اصلی ولتاژ یا جریان.

تذکر ۱: بر اساس صفحه ۲۷ استاندارد مذکور، برای شبکه‌هایی که نقطه نول آنها به طور مستقیم زمین شده باشد، مقدار توالی صفر نیز به جای توالی منفی می‌تواند بکار رود.

طبق استاندارد کیفیت برق ایران درصد عدم تعادل ولتاژ، نسبت مقدار مؤلفه صفر یا منفی ولتاژ به مقدار مؤلفه توالی مثبت آن ضربدر ۱۰۰، نامیده می شود [۲].

مقدار مجاز عدم تعادل ولتاژ طبق استاندارد [۱] برابر ۲٪ (برای بعضی مناطق با بارهای تکفاز بزرگ برابر ۳٪) و طبق استاندارد ایران برای شبکه‌های توزیع برابر ۲٪ می‌باشد.

در استانداردهای مذکور، معیاری برای عدم تعادل جریان بیان نشده است.

در استاندارد مرجع [۱]، تقریب زیر برای محاسبه میزان عدم تعادل (توالی منفی به مثبت) بیان شده است که معیار عدم تعادل جریان با عنوان "میزان انحراف از حالت تعادل" در این دستورالعمل نیز همین است (در این تقریب نیازی به اندازه‌گیری فازهای جریانها نیست.).

$$\sqrt{\frac{6\times(I_A^2+I_B^2+I_C^2)}{(I_A+I_B+I_C)^2}-2}$$

برای چگونگی محاسبه معیار و مقایسه معیارهای مختلف عدم تعادل به مراجع [۳-۵] رجوع کنید.

قابل ذکر است که برای سهولت در امر اندازه‌گیری و محاسبه انحراف از حالت تعادل، به جای مقدار موثر مولفه اصلی جریان می‌توان از مقدار موثر جریان هر فاز نیز استفاده نمود.

٤-٢- تعادل بار در فیدرهای فشار ضعیف

به دلیل آنکه تلفات با مجذور جریان متناسب است لذا کمترین میزان تلفات زمانی حاصل می‌شود که جریان در سه فاز مساوی باشد (این مساله در زمانی صادق است که ضریب قدرت بارها با هم برابر باشند. در حالت کلی، یکی کردن جریان فازها باعث کمترین تلفات نخواهد شد. برای اطلاعات بیشتر به ضمیمه ۱ رجوع کنید.). البته در عمل به دلیل تغییرات جریان بار امکان مساوی کردن جریان در سه فاز در تمامی زمان‌ها وجود ندارد. اما می‌توان توسط الگوریتمی که در زیر بیان می‌شود به حداکثر تعادل در سه فاز دست یافت. لازم به ذکر است تعادل بار باید در طول فیدر انجام شود تا تلفات خط فشار ضعیف کاهش یابد و جابجایی مشترکین در ابتدای فیدر به منظور برابر نمودن جریان سه فاز تنها سبب کاهش تلفات ترانسفورماتور می‌شود و تأثیری بر کاهش تلفات شبکه ندارد.

الگوریتم انجام محاسبات تعادل بار به شرح زیر است:

۱- پیدا کردن گره (نقطه اتصال کابل سرویس مشترکین با شبکه فشار ضعیف) انتهایی که تعادل بار روی آن انجام نشده باشد.

۲- مد نظر قرار دادن تمام ترکیبات ممکن تغذیه بارها بر روی گره مورد نظر و انتخاب بهترین ترکیب با شروط زیر:

۲-۱- کمترین میزان انحراف از حالت تعادل:

کمترین میزان انحراف از تعادل ابتدا با پخش متعادل مشترکین از یک نوع روی گره با توجه به آمپراژ قراردادی تعیین می گردد. سپس در صورتی که تعدادی از مشترکین از انواع مختلف روی گره باقی ماندند، با توجه به آمپراژ قراردادی آنها (در صورت وجود آمپر مشارکت در پیک این مشترکین، استفاده از آن بهتر است و توصیه می‌شود.) عمل اختصاص این مشترکین به فازها به منظور رسیدن به تعادل بیشینه انجام می‌شود.

تذکر ۲: آمپراژ قراردادی همان آمپراژ فروخته شده به مشترک است.

تذکر ۳: در مورد مشترکین تکفاز خانگی در روی یک فیدر آمپراژ قراردادی به صورت مساوی (۲۵ آمپر) در نظر گرفته می‌شود.

۲-۲- کمترین تعداد جابجایی بارها بین فازها:

برای هر ترکیب، ابتدا میزان انحراف از حالت تعادل محاسبه شده و با بهترین حالت قبلی مقایسه می‌شود. در صورتی که ترکیب فعلی، انحراف از تعادل کمتری داشته باشد، این ترکیب جایگزین ترکیب قبلی می‌شود. در صورتی‌که میزان انحراف از تعادل ترکیب فعلی با میزان انحراف از تعادل ترکیب قبلی مساوی باشد، آنگاه تعداد جابجایی فازهای ترکیب فعلی محاسبه شده و در صورتی که این مقدار کمتر از تعداد جابجایی فازها در ترکیب قبلی باشد این ترکیب به عنوان ترکیب برتر ذخیره می‌شود. سپس ترکیب بعد تشکیل داده می‌شود و مراحل بالا تا آزمایش تمام ترکیبات ممکن ادامه می‌یابد.

۳- انتقال نامتعادلی احتمالی از گره قبلی به گره جدید و تکرار مراحل فوق برای تمام گره‌ها (از انتها به سمت ابتدای فیدر)

در الگوریتم فوق‌الذکر موارد زیر را نیز باید در نظر داشت:

- در صورتی‌که شبکه دو فاز یا تک‌فاز باشد، این محدودیت باید در نظر گرفته شود. بعنوان مثال برای پایه‌ای که فقط فاز R را دارد، امکان جابجایی فاز تغذیه مشترکین وجود نخواهد داشت (قابل ذکر است که حتی‌الامکان نباید فیدرهای تکفاز یا دو فاز در شبکه احداث گردد).
- در صورت وجود فیدرهای تکفاز یا دو فاز باید جمع آمپراژ قراردادی هر فاز فیدر را به صورت یک بار تکفاز در محل انشعاب از سیستم سه فاز در نظر گرفت و عملیات تعادل بار را از آن نقطه به بعد در شبکه سه فاز انجام داد.
- مشترکین سه‌فاز در این الگوریتم وارد نمی‌شوند و فرض بر این است که مشترکین سه فاز به طور متعادل از سه فاز مصرف می‌کنند.
- برای هر نوع مشترکین (خانگی، تجاری و . . .) به صورت جدا تعادل بار باید برقرار شود.
- فیدر روشنایی: اینگونه فیدرها ترجیحا باید به صورت ۳ فاز از پست خارج شده و به صورت متعادل بهره‌برداری شوند. فیدرهای روشنایی تکفاز نیز به عنوان مشترکینی از یک نوع در نظر گرفته و بر اساس روش مذکور در این دستورالعمل انجام خواهد شد.

- در مورد مجتمع‌هایی که انشعاب سه‌فاز وارد ساختمان شده و به صورت تکفاز به آپارتمـان‌هـا داده شده است، باید تعداد مشترکین تکفاز روی هر فاز مشخص و در الگوریتم مد نظر قرار گیرد.

جدول ١: ورودی‌های لازم برای "تعادل بار"

ردیف	نام ورودی	منبع اطلاعات
١	اطلاعات شبکه فشار ضعیف	شرکت توزیع
٢	اطلاعات مشترکین	شرکت توزیع

جدول ٢: خروجی‌های "تعادل بار"

ردیف	نام خروجی
١	فاز مناسب تغذیه هر مشترک

٤-٣- گردش کار الصاق برچسب فاز تغذیه بر روی کنتورهای مشترکین تکفاز

به منظور متعادل ماندن فیدرهای فشار ضعیف متعادل‌شده، فاز مشترکین تکفاز جدیـد بایـد مـشخص و جهـت اعمال بر روی کنتور مشترک الصاق گردد. در شکل ١ گردش کار این مساله نشان داده شده است.

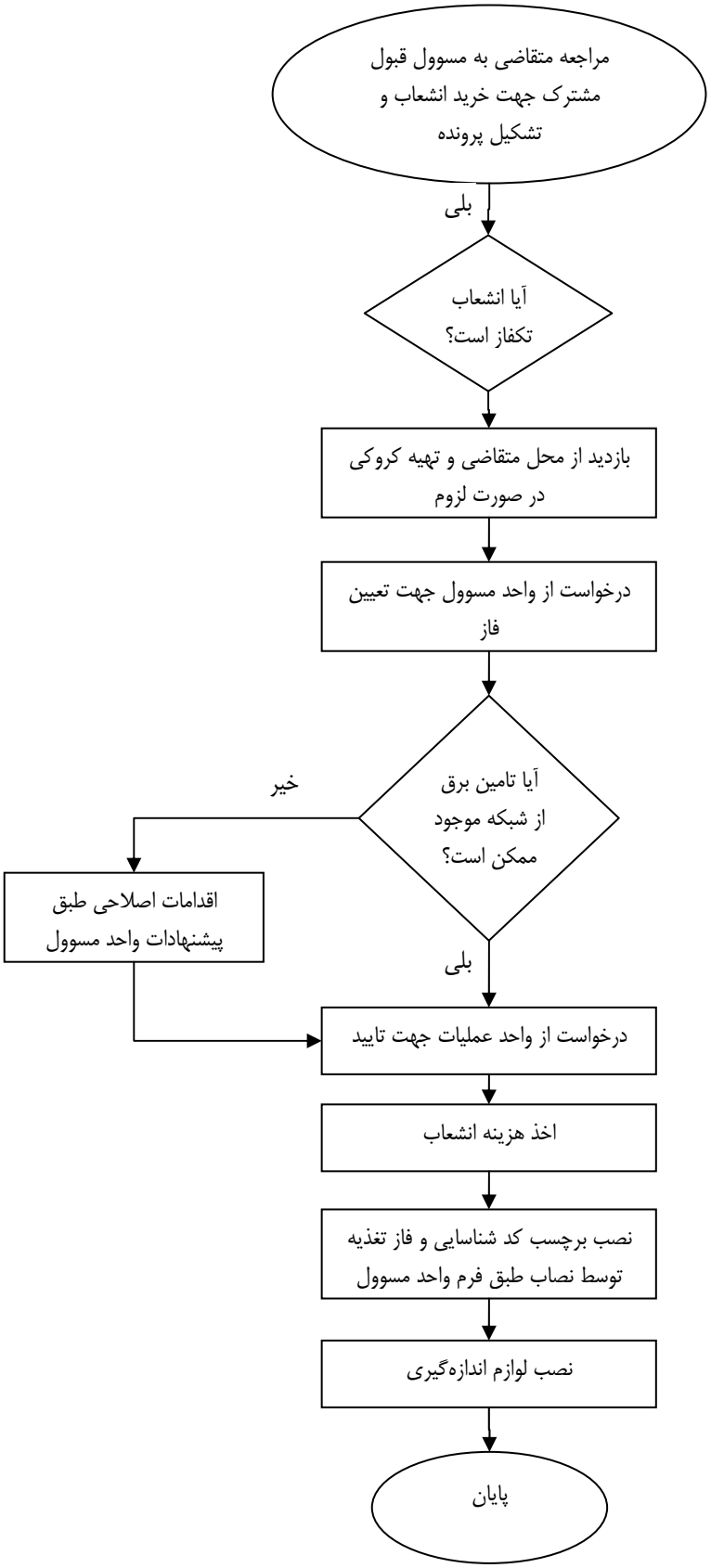
منظور از واحد مسوول در شکل ١ واحدی است که مسوولیت تعیین فـاز تغذیـه مـشترکین را برعهـده دارد. بـا توجه به اطلاعات مورد نیاز برای تعیین فاز تغذیه، توصیه می‌گردد که واحد مسوول همان واحـد مکانیزاسـیون، برنامه‌ریزی، مطالعات شبکه، بهره‌برداری یا نظایر آن باشد.

همچنین برای مشترکین فیدر تحت مطالعه نیز باید الصاق برچسب فاز تغذیه در حین اجرا، صورت پذیرد.

تذکر ٤: واحد مسوول همان واحدی است که انجام مطالعات متعادل‌سازی بار فازهـا و نظـارت بـر جابجـایی مشترکین جهت متعادل‌سازی را بر عهده دارد. اطلاعات پایه به پایه مربوط به نوع و فاز مشترکین و اطلاعـات استاتیکی و دینامیکی هر فیدر تحت مطالعه در این واحد نگهداری و بروز می‌شود.

تذکر ٥: اگر در فیدر متعادل‌شده امور نوسازی، احداث، حذف اشتراک و غیره صورت پذیرفت، عمل تعادل بـار باید دوباره روی آن صورت پذیرد.

تذکر ٦: بعد از فروش انشعاب در طول سال، جهت اطمینان از حصول تعادل بیشینه، سـالی یکبـار مطالعـات تعادل بار و عملیات مربوطه طبق این دستورالعمل روی فیدر مذکور صورت پذیرد.



شکل ۱: گردش کار الصاق برچسب فاز بر روی کنتورهای مشترکین تکفاز

٤-٤- تخمین تلفات ناشی از عدم تعادل روی فیدر فشار ضعیف

٤-٤-١- روش اول

در صورت مدل‌سازی شبکه فشار ضعیف تحت مطالعه در نرم‌افزار، تعیین تلفات انرژی و توان توسط نـرم‌افـزار مربوطه صورت خواهد پذیرفت.

تذکر ۷: اگر فیدر فشار ضعیف در گره‌های مختلف زمین شده باشد، باید زمین به صورت مقاومـت مـوازی بـا مقاومت نول شبکه شبیه‌سازی گردد (مانند آنچه در روش دوم بیان شده است.).

تذکر ۸: تلفات اضافی ترانسفورماتور توزیع تغذیه‌کننده ناشی از عدم تعـادل نیـز بایـد محاسـبه گـردد (بـرای اطلاعات بیشتر به ضمیمه ۲ رجوع کنید.). برای پیدا کردن اثر عدم تعادلی فیدر مورد مطالعه بر تلفـات اضـافی ترانسفورماتور باید تمام فیدرهای آن مطالعه شوند.

تذکر ۹: بررسی چگونگی پخش شدن عدم تعادل در فشار متوسـط و ازدیـاد تلفـات ناشـی از آن در اولویـت بعدی قرار دارد. برای اطلاعات بیشتر به مرجع [۶] مراجعه کنید. در صورت استفاده از ترانسفورماتورهای توزیـع تکفاز و/یا دوفاز، مطالعات عدم تعادل بار فازها در فشار متوسط و ازدیاد تلفات ناشی از آن نیز همزمان با انجـام مطالعات تعادل بار در فیدرهای فشار ضعیف باید صورت پذیرد. در اینحالت باید ترانسفورماتورهای توزیع تکفـاز و/یا دوفاز با توجه به توان مشارکت در پیک و فاصله از پست فوق‌توزیـع بـرای هـر فـاز در طـول فیـدر فـشار متوسط توزیع گردند.

٤-٤-٢- روش دوم

در این روش تلفات تقریبی در یک سکشن (فاصله بین دو انشعاب مشترکین از شبکه فشار ضعیف که در شبکه هوایی می‌تواند بین ۲ تیر متوالی باشد.) فیدر فشار ضعیف به صورت زیر محاسـبه مـی‌شـود. همـانطور کـه در روابط دیده می‌شود، برای بدست آوردن تلفات کل فیدر، نیاز به دانستن مقاومت‌ها و جریان نول در هر سکـشن می‌باشد.

$$P_1 = R_p(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) + (R_n \parallel R_G).I_n^2$$

که در این رابطه:

I_a, I_b, I_c: اندازه موثر مولفه اصلی جریان فازهای A و B و C سکشن(آمپر).

I_n: اندازه موثر مولفه اصلی جریان گذرنده از مقاومت موازی نول و زمین در حالت نامتعـادل در هـر سکـشن، محاسبه‌شده (آمپر).

R_p: مقاومت کل هر فاز سکشن (اهم).

R_n: مقاومت کل نول سکشن (اهم).

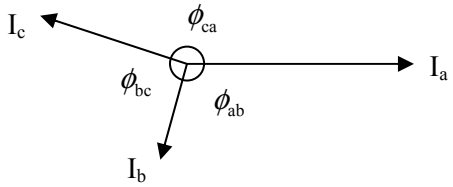
R_G: مقاومت زمین سکشن (اهم).

P_1: تلفات مولفه اصلی فیدر در حالت نامتعادل سکشن (وات).

متوسط گیری از جریان‌های فازها به عنوان جریان متعادل هر فاز با توجه به دستورالعمل بیان‌شده فرض شـده است. همانطور که بیان شد، در حالت کلی، یکی کردن جریان فازها باعث کمترین تلفات نخواهد شد. توجه بـه این نکته ضروری است که رسیدن به تعادل کامل قابل دسترسی نیست. ولی با تقریب جریان هر فاز را متوسط جریان‌های فازهای مختلف در نظر می‌گیریم.

جریان نول در حالت کلی، مانند شکل ۲، به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$I_n = \overline{I_a} + \overline{I_b} + \overline{I_c} = \sqrt{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + 2I_a.I_b.\cos\phi_{ab} + 2I_b.I_c.\cos\phi_{bc} + 2I_c.I_a.\cos\phi_{ca}}$$



شکل ۲: جریانهای فازهای مختلف

تلفات مولفه اصلی فیدر در حالت متعادل (وات) در هر سکشن، P_2، بر اساس فـرض مـذکور بـه صـورت زیـر بدست می‌آید.

$$P_2 = 3R_p(\frac{I_a+I_b+I_c}{3})^2$$

در نتیجه پتانسیل کاهش تلفات هر سکشن با تقریب مذکور به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$P_{Loss\,\mathrm{Re}\,ductionPotential,Section} = P_1 - P_2 = (\frac{2}{3}R_p + R_n \parallel R_G).I_n^2$$

تلفات کل فیدر و پتانسیل کاهش تلفات آن نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$P_{Loss\,\mathrm{Re}\,ductionPotential,Feeder} = \Delta P = \sum_{i=1}^{k}(\frac{2}{3}R_{pi} + R_{ni} \parallel R_{Gi}).I_{ni}^2$$

$$Loss\ \ reduction\ Potential\ \% = \frac{\Delta P}{P_{1T}} \times 100$$

که در این روابط:

R_{pi}: مقاومت کل هر فاز سکشن i ام (اهم).

R_{ni}: مقاومت کل نول سکشن i ام (اهم).

R_{Gi}: مقاومت زمین سکشن i ام (اهم).

I_{ni}: اندازه موثر مولفه اصلی جریان گذرنده از مقاومت موازی نول و زمین در حالت نامتعـادل در هـر سکـشن، محاسبه‌شده (آمپر).

P_{1T}: تلفات مولفه اصلی کل فیدر در حالت نامتعادل (وات).

ΔP: پتانسیل کاهش تلفات کل فیدر (وات).

k : تعداد سکشن فیدر.

تذکر ۱۰ : جبران‌سازی عدم تعادل روی مولفه اصلی صورت می‌پذیرد. به این منظور برای انجـام محاسـبات باید این مولفه را محاسبه و در روابط استفاده نمود. برای مثال، وجود هارمونیک فـرد مـضرب ۳ باعـث جریـان نول زیاد می‌شود که اگر در محاسبات وارد شود، نشان دهنده تلفات بیشتری خواهد بود ولی این مولفـه جریـان با متعادل‌سازی فیدر جبران نمی‌شود و از بین نخواهد رفت.

تذکر ۱۱: توصیه می‌شود اندازه‌گیری‌ها در زمان پیک بار انجام گیرد.

تذکر ۱۲: جایی در طول فیدر که زمین شده باشد، به صورت یک مقاومت (همان مقاومت انـدازه‌گیـری‌شـده زمین) به زمین مدل‌سازی می‌شود. اگر مقاومت زمین حدود ۱۰ برابر مقاومت سیم نول (بـین دو نقطـه زمـین-شده) باشد، می‌توان از مقاومت زمین در محاسبات مذکور صرفنظر کرد.

تذکر ۱۳: اگر جریان نول به جای محاسبه از اندازه‌گیری مشخص شـود، مقاومـت زمـین بایـد از محاسـبات مذکور حذف گردد.

تذکر ۱٤: برخی ساده‌سازی‌ها با توجه به ساختار فیدر فشار ضعیف و پارامترهای طراحی آن،

فرض ۱: اگر در طول یک فیدر فشار ضعیف سطح مقطع فازها برابر و مقدار آن w برابر سطح مقطع نول باشد (در شبکه‌های فعلی $w \le 1$ است.)، همچنین تذکر ۱۲ معتبر و طول سکشن‌ها نیز برابر باشد، پتانسیل کـاهش تلفات در کل فیدر از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{Loss\,\mathrm{Re}\,ductionPotential,Feeder} = \Delta P = \frac{R_{pt}}{k}(\frac{2}{3}+w)\sum_{i=1}^{k} I_{ni}^2$$

$$P_{1T} = \frac{R_{pt}}{k}\sum_{i=1}^{k}(I_{ai}^2 + I_{bi}^2 + I_{ci}^2 + wI_{ni}^2)$$

$$Loss\ \ reduction\ Potential\ \% = \frac{\Delta P}{P_{1T}} \times 100$$

که در این روابط:

R_{pt}: مقاومت فاز کل فیدر (اهم).

I_{ai}, I_{bi}, I_{ci}: اندازه موثر مولفه اصلی جریان فازهای A و B و C در حالت نامتعادل سکشن i ام (آمپر).

I_{ni}: اندازه موثر مولفه اصلی جریان گذرنده از نول در حالت نامتعادل در هر سکشن، محاسبه‌شده (آمپر).

w: نسبت سطح مقطع نول به سطح مقطع فاز.

P_{1T}: تلفات مولفه اصلی کل فیدر در حالت نامتعادل (وات).

ΔP: پتانسیل کاهش تلفات کل فیدر (وات).

k : تعداد سکشن فیدر.

فرض ۲: اگر فرض کنیم جریان نول در هر سکشن متناسب با جریان فازهای همان سکشن باشد (یعنـی عـدم تعادل به یک نسبت در سکشن‌ها به سمت ابتدای فیدر ادامه یابد.)، جریان نول در هر سکشن به صورت خطی

در طول فیدر کاهش می‌یابد. در این صورت با در نظر گرفتن فرض ۱ برای پتانسیل کاهش تلفات در کل فیدر خواهیم داشت: (سکشن‌ها را از ابتدای فیدر به انتهای آن شماره‌گذاری می‌کنیم.)

$$I_{ni}=\begin{cases}\dfrac{k-i}{k-1}I_N & k\neq 1\\ I_N & k=1\end{cases}$$

$$P_{Loss\,\mathrm{Re}ductionPotential,Feeder}=\Delta P\approx\begin{cases}(\dfrac{2}{3}+w)\dfrac{2k-1}{6(k-1)}R_{pt}I_N^2 & k\neq 1\\ (\dfrac{2}{3}+w)R_{pt}I_N^2 & k=1\end{cases}$$

$$Loss\ \ reduction\ Potential\ \%=\frac{\Delta P}{P_{1T}}\times 100\approx\frac{(\frac{2}{3}+w)I_N^2}{I_A^2+I_B^2+I_C^2+wI_N^2}\times 100$$

در این روابط:

I_A, I_B, I_C: اندازه موثر مولفه اصلی جریان فازهای A و B و C در حالت نامتعادل سکشن شماره ۱، ابتدای فیدر (آمپر).

I_N: اندازه موثر مولفه اصلی جریان گذرنده از نول در حالت نامتعادل در سکشن شماره ۱، ابتدای فیدر (آمپر).

R_{pt}: مقاومت فاز کل فیدر (اهم).

P_{1T}: تلفات مولفه اصلی کل فیدر در حالت نامتعادل (وات).

ΔP: پتانسیل کاهش تلفات کل فیدر (وات).

w: نسبت سطح مقطع نول به سطح مقطع فاز.

k : تعداد سکشن فیدر.

٤-٥- تحلیل اقتصادی کاهش تلفات ناشی از تعادل بار

میزان سود به هزینه اجرای عملیات تعادل بار بر روی هر فیدر تحت مطالعه باید محاسبه گردد.

از دید تلفات، هم مولفه توالی صفر و هم مولفه توالی منفی باعث افزایش تلفات می‌شود. زیرا:

- مولفه توالی صفر هم باعث عدم تعادل بین فازها و هم باعث ایجاد جریان نول می‌شود.
- مولفه توالی منفی تنها باعث عدم تعادل بین فازها می‌شود. (برای اطلاعات بیشتر به ضمیمه ۳ مراجعه کنید.)

٤-٥-١- سود حاصل از تعادل بار

میزان سود ناشی از تعادل بار شامل ۲ بخش کاهش تلفات توان و انرژی می‌باشد که به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$Total\ Benefit=(\Delta P_{Loss,Feeder}\times C_{Power\ Loss}+\Delta E_{Loss,Feeder}\times C_{Energy\ Loss})\times n$$

که در این رابطه:

$\Delta P_{Loss,Feeder}$: تغییرات تلفات توان در پیک بار (کیلووات).

$\Delta E_{Loss,Feeder}$: تغییرات تلفات انرژی در سال (کیلووات ساعت).

$C_{Power\ Loss}$: هزینه تلفات توان در سال مطالعه (ریال بر کیلووات بر سال)

$C_{Energy\ Loss}$: هزینه تلفات انرژی در سال مطالعه (ریال بر کیلووات ساعت)

n : عمر باقیمانده از شبکه تحت مطالعه (سال)

برای هزینه‌های تلفات توان و انرژی به مرجع [۷] رجوع کنید.

برای بدست آوردن تلفات انرژی از رابطه ضریب تلفات استفاده می‌شود. برای اطلاعـات بیـشتر بـه مرجـع [۸] رجوع کنید.

تذکر ۱۵: از نرخ بهره و تورم صرفنظر شده است، زیرا هم در هزینه تلفات توان و انرژی ظاهر می‌شوند و هم در ارزش زمان حال هزینه تلفات.

٤-٥-٢- هزینه تعادل بار

هزینه متعادل نمودن بار طبق دستورالعمل به صورت زیر خواهد بود:

هزینه کل = هزینه برداشت اطلاعات * +
هزینه مطالعات متعادل‌سازی +
هزینه الصاق برچسب فاز تغذیه روی کنتور +
هزینه جابجایی مشترکین[۲] +
هزینه سربار اداری

* : هزینه‌های برداشت اطلاعات به فرمت GIS در بخش مربوطه انجام شده است.

۲: هزینه جابجایی مشترکین به صورت تخمینی قبل از انجام طرح محاسبه می‌شود.

٤-٥-٣- اولویت بندی طرح ها و محاسبه سود به هزینه

با توجه به تعیین سود و هزینه‌ها، عملیات متعادل‌سازی بار فیدرها بر اساس معیار سود به هزینـه اولویـت‌بنـدی می‌شوند:

$$\text{سود به هزینه} = \frac{\text{سود حاصل از تعادل بار}}{\text{هزینه تعادل بار}}$$

تذکر ۱۶: اگر محاسبه هزینه جابجایی مشترکین به صورت تخمینی قبل از انجام طـرح ممکـن نبـود، بـرای اولویت‌بندی طرح‌ها می‌توان از میزان کاهش تلفات توان (ΔP) ناشی از متعادل‌سازی بار فیدرها استفاده نمود.

مراجع

[1] IEC 61000-2-2: Electromagnetic compatibility (EMC) Part 2-2: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems, 2002-03.

[۲] استاندارد صنعت برق ایران – مشخصات و خصوصیات انرژی الکتریکی (کیفیت برق)، قسمت چهارم: تغییرات ولتـاژ و فرکانس، شرکت توانیر، چاپ اول، اردیبهشت ۱۳۸۱.

[3] Asheesh K. Singh, G. K. Singh, and R. Mitra, "Some Observations on Definitions of Voltage Unbalance", 39th North American Power Symposium, NAPS '07, Pages: 473-479, Sept. 30 2007-Oct. 2 2007.

[4] Jong-Gyeum Kim, Eun-Woong Lee, Dong-Ju Lee, Jong-Han Lee, "Comparison of Voltage Unbalance Factor by Line and Phase Voltage", Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2005, Vol. 3, Pages: 1998 – 2001, 29-29 Sept. 2005.

[5] A. von Jouanne, B. Banerjee, "Assessment of Voltage Unbalance", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 4, Pages: 782-790, October 2001.

[6] M. Chindriş, A. Cziker, Anca Miron, H.Bălan, Ana Iacob, A. Sudria, " Propagation of Unbalance in Electric Power Systems", 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilization, Barcelona, 9-11 October 2007.

[۷] م. ح. امراللهی، ع. عارفی، ا. یاورطلب، ج. علمایی، "مدل جامع محاسبه ارزش تلفات در شبکه‌های توزیـع"، بیـست و دومین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، ایران، ۲۸ تا ۳۰ آبان، ۱۳۸۶.

[۸] "مرجع کاربردی تعیین و کاهش تلفات در سیستم‌های توزیع"، ترجمه و تالیف: علـی عـارفی، اکبـر یاورطلـب، ناشـر: شرکت توانیر، شابک: X–۲۳–۷۶۱۵–۹۶۴، اسفند ۱۳۸۶.

مراجع دیگر:

[9] Tsai-Hsiang Chen, Member, IEEE, and Jeng-Tyan Cherng, "Optimal Phase Arrangement of Distribution Transformers Connected to a Primary Feeder for System Unbalance Improvement and Loss Reduction Using a Genetic Algorithm", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 3, Pages: 994-1000, August 2000.

[10] D. R. Smith, H. R. Braunstein, J. D. Borst, "Voltage Unbalance in 3- and 4-Wire Delta Secondary Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No.2, Pages: 733-741, April 1988.

[11] T.-H. Chen, "Evaluation of line loss under load unbalance using the complex unbalance factor", IEE Proceeding of Generation, Transmission and Distribution, Vol. 142, No. 2, Pages: 173-178, March 1995.

[12] Luis F. Ochoa, Rade M. Ciric, A. Padilha-Feltrin, Gareth P. Harrison, "Evaluation of Distribution System Losses Due to Load Unbalance", 15th PSCC, Liege, 4 Pages, 22-26 August 2005.

[13] M.P. Selvan, K.S. Swarup, "Modeling and analysis of unbalanced distribution system using object-oriented methodology", Elsevier Journal on Electric Power Systems Research, Pages: 968–979, Vol. 76, 2006.

[14] Robert T. Emmet, Mohan L. Ray P.E., "Controlling Unbalanced Supply in Weak Utility Systems", American Power Conference, Chicago, 16 April 2003.

[15] P. Caranria P, Verde D. Menniti, "Evaluation of the Losses in Unbalanced Three-Phase Power Systems", 8th Mediterranean Electrotechnical Conference, MELECON '96, Vol. 2, Page(s):715 – 720, 13-16 May 1996.

ضمیمه ها

ضمیمه ۱: تلفات و جریان های فازهای متفاوت

منبع تغذیه، ۳ فاز متعادل فرض شده است.

با مقاومت‌هایی مفروض برای فاز و نول.

ردیف	نام فازهای تغذیه	مقدار جریان (A)	زاویه جریان (درجه)	تلفات (وات)	اندازه جریان نول (A)
۱	A	۱۰	-۲۰	۶۴/۹۴۵۱	۵/۷۴۱۷
	B	۱۰	-۱۷۰		
	C	۱۰	۱۱۰		
۲	A	۱۰	-۲۰	۶۳/۷۷۹۴	۵/۲۵۸۲
	B	۱۰/۳۸۸	-۱۶۸/۲۲۷		
	C	۹/۵	۱۱۰		
۳	A	۱۰	-۲۰	۶۲/۷۲۳۱	۴/۶۳۸۱
	B	۱۱/۱۹۰۷	-۱۶۵/۰۵۷		
	C	۸/۵	۱۱۰		

در این مثال بارهای فازهای مختلف از نظر اندازه با هم برابر ولی ضریب قدرت‌های متفاوت دارند. در حالات ۲ و ۳ بـه ترتیـب ۰/۵ و ۱/۵ آمپر از فاز C به فاز B منتقل شده است و مشاهده می‌شود که حالت ۳ کمترین تلفات را دارد با اینکه اندازه جریان‌های ایـن حالت با هم یکی نیست. البته اگر این انتقال بار ادامه یابد، تلفات مجدد افزایش پیدا خواهد نمود.

این مثال نشان می‌دهد که برای رسیدن به تلفات بهینه، جریان هر فازی که ضریب قدرت پایین‌تری دارد، بیشتر از فازهـای دیگـر باشد. در اینحالت کمترین جریان نول حاصل خواهد شد.

با تقریب و فرض نزدیک بودن ضریب قدرت‌های فازهای مختلف، می‌توان حالت بهینه را یکسان بودن جریان فازها تعریف نمود.

ضمیمه ۲: ازدیاد تلفات ناشی از عدم تعادل در ترانسفورمر توزیع

عدم تعادل بار باعث افزایش تلفات مسی ترانسفورماتور می‌شود. نحوه محاسبه این تلفات با تقریب در روابط زیر آمـده اسـت. منبـع تغذیه، ۳ فاز متعادل فرض شده است.

$$P_{\mathrm{Cu1}} = \frac{1}{3}\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{I_{rated}^2}.P_{Cu,rated}$$

$$P_{Cu2} = \frac{(\frac{I_a + I_b + I_c}{3})^2}{I_{rated}^2}.P_{Cu,rated}$$

$$\Delta P_{Cu} = P_{Cu1} - P_{Cu2} = \frac{2}{9}\frac{P_{Cu,rated}}{I_{rated}^2}(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 - I_a.I_b - I_b.I_c - I_c.I_a)$$

که در این رابطه:

P_{Cu1}: تلفات مسی ترانسفورماتور در حالت بار نامتعادل (وات).

P_{Cu2}: تلفات مسی ترانسفورماتور در حالت بار متعادل‌شده (وات).

$P_{Cu,rated}$: تلفات مسی نامی ترانسفورماتور در حالت متعادل (وات).

I_{rated}: جریان خط نامی ترانسفورماتور (آمپر).

I_a, I_b, I_c: اندازه موثر مولفه اصلی جریان فازهای A و B و C (آمپر).

ضمیمه ۳: توالی های مثبت، منفی و صفر جریان خط و جریان نول به ازای بارهای تکفاز متفاوت

منبع تغذیه، ۳ فاز متعادل فرض شده است.

ردیف	نام فازهای تغذیه	مقدار اکتیو بارها (Kw)	ضریب قدرت بارها (٪)	اندازه توالی مثبت (A)	زاویه توالی مثبت (درجه)	اندازه توالی منفی (A)	زاویه توالی منفی (درجه)	اندازه توالی صفر (A)	زاویه توالی صفر (درجه)	اندازه جریان نول (A)
۱	A	۵	۱۰۰	۲۱/۷۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	B	۵	۱۰۰							
	C	۵	۱۰۰							
۲	A	۵	۸۰	۲۷/۱۷	-۳۶/۹	۰	۰	۰	۰	۰
	B	۵	۸۰							
	C	۵	۸۰							
۳	A	۷	۸۰	۲۷/۱۷	-۳۶/۹	۶/۲۸	-۶/۹	۶/۲۸	-۶۶/۹	۱۸/۸۳
	B	۵	۸۰							
	C	۳	۸۰							
٤	A	۵	۹۰	۲۷/۱۹	-۳۶/۹۳	۳/۳۶	۱۲۰/۲۸	۳/۳۶	۵۹/۷۲	۱۰/۱۰
	B	۵	۸۰							
	C	۵	۷۰							
۵	A	۷	۹۰	۲۶/۲۹	-۳۴/۲۲	۵/۸۰	۲۶/۹۰	۴/۲۸	-۳۵/۵۵	۱۲/۸۴
	B	۵	۸۰							
	C	۳	۷۰							
٦	A	۷	۷۰	۲۸/۱۵	-۳۹/۴۵	۸/۳۰	-۲۹/۳۷	۹/۲۱	-۸۰/۸۵	۲۷/۶۲
	B	۵	۸۰							
	C	۳	۹۰							

ضمیمه ٤: اعضای کمیته تعیین و کاهش تلفات – متعادل نمودن بار فازها در شبکه‌های توزیع

ردیف	نام و نام خانوادگی	شرکت / دانشگاه
۱.	مهندس اکبر یاورطلب	توانیر– دفتر پشتیبانی فنی توزیع
۲.	دکتر محمودرضا حقی فام	دانشگاه تربیت مدرس
۳.	مهندس علی عارفی	دانشگاه تربیت مدرس
۴.	دکتر جواد علمایی	دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب
۵.	دکتر احمدعلی بهمن‌پور	مهندسین مشاور نورگستر
۶.	مهندس مهرداد مستقیمی	قدس نیرو
۷.	مهندس غلامرضا صفارپور	قدس نیرو
۸.	مهندس کاظم بخشی	توزیع تهران بزرگ
۹.	مهندس علی‌اصغر حسن‌زاده	توزیع استان بوشهر
۱۰.	مهندس آمنه علیپور	توزیع استان همدان
۱۱.	مهندس عباس پیری	توزیع آذربایجان غربی
۱۲.	مهندس رضا قطب الدینی	توزیع شمال کرمان