

## اثرات عدم تعادل بار در شبکه های توزیع

### چکیده

همانطوریکه مستحضر هستید، هدف از تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی، سرویس دادن اصولی و مداوم به مشترکین شرکتهای برق منطقه‌ای می‌باشد. لذا، چون سیستم توزیع ۴۰۰ ولت در دسترس اغلب مردم بوده و از طرفی دارای بیشترین وسعت و تجهیزات می‌باشد، لازم است توجه خاصی به آن مبذول گردد.

در اینجهت می‌بایستی مسائل فنی و اقتصادی سیستم توزیع را تواما" مورد بررسی قرارداد و دقیقاً" مد نظر کارشناسان و متخصصین امر واقع گردد. بدیهی است این بررسیها و دقت نظرها باعث افزایش کارایی و بازدهی تجهیزات سیستم فوق خواهد شد.

متأسفانه این مطلب از دید بسیاری از کارشناسان و متخصصین فنی دور مانده و درایران به آن کمتر اهمیت داده می‌شود. زیرا اغلب آنها مسئله فوق را غیر قابل طرح انگاشته و تنها بررسی مشکلات نیروگاهها و شبکه‌های انتقال را مورد توجه قرار می‌دهند و از این مهم غافل شده‌اند. در این مقاله سعی شده است مسائل و مشکلاتی که بخاطر عدم تعادل بار در شبکه‌های توزیع برای مصرف کنندگان و شبکه پیش آمده تواما" با توجه به مسائل اقتصادی مطرح و مورد بررسی قرار گیرد. فرمولها و روابط ریاضی مورد نظر به صورت خلاصه بیان شده و همچنین موارد عملی و نتایج آن در شبکه توزیع برق منطقه‌ای اصفهان برای اطلاع و توجه خاص کارشناسان مربوطه شرکتهای برق منطقه‌ای آورده شده است.

برخی از اثرات نامطلوب عدم تعادل بار در زیر آورده شده و با توجه به عدم امکان محاسبات در هر مورد بخاطر محدودیت مقاله تنها به ذکر پاره‌ای از محاسبات پرداخته می‌شود.

■ تلفات توان :

در اثر عدم تعادل بار در دو قسمت عمده شبکه یعنی فازها و سیم نول تلفاتی ایجاد

می‌گردد. در حالت عدم تعادل بار مقدار تلفات در سیم‌های فازها بیشتر از حالت متعادل بوده و ضمناً " تلفات سیم‌نول نیز به آن اضافه می‌شود و بدلیل اینکه اصولاً " سطح مقطع سیم نول کمتر از سیمهای فاز می‌باشد، بنابراین تلفات سیم نول بیشتر از سیمهای فاز است.

#### ■ افت ولتاژ :

در حالت نامتعادلی چون سیم نول دارای جریان می‌باشد، لذا علاوه بر افت ولتاژ طبیعی در فازها که بخاطر جریان بار وجود دارد مقدار ولتاژ نول نیز افزایش یافته و اختلاف پتانسیل فاز و نول مقداری کمتر از حالت متعادل می‌باشد.

#### ■ نامتعادلی ولتاژهای سه‌فاز :

چون در حالت عدم تعادل بار، با وجود یکسان بودن امپدانس فازها، جریان عبوری از آنها متفاوت می‌باشد، لذا افت ولتاژهای مختلفی در آنها بوجود آمده و در نتیجه ولتاژ نامتعادلی در نقطه بار خواهیم داشت که اثرات سوئی برای موتورها داشته که عبارتند از :

– کاهش گشتاور بار و در نتیجه توان موتور

– افزایش تلفات آهن در موتورها

– افزایش لرزش در موتورها

#### ■ کاهش ظرفیت شبکه و ترانسفورماتورها :

بر اثر عدم تعادل بار ممکن است یکی از فازهای شبکه و یا ترانسفورماتور دارای شدت جریانی بیشتر از ظرفیت آن شود، در صورتیکه دو فاز دیگر دارای شدت جریانی کمتر از شدت جریان نامی آن می‌گردد، بنابراین در این حالت نمی‌توان از ظرفیت کامل شبکه و یا ترانسفورماتور استفاده نمود. علاوه بر اینکه عمر دستگاه و یا شبکه نیز کاهش می‌یابد.

### ■ کاهش ایمنی مصرف‌کننده‌ها :

افزایش نامتعادلی سبب افزایش نول شبکه گشته و در پی آن ولتاژ نول نسبت به زمین افزایش می‌یابد و چونکه مصرف‌کنندگان اصولاً " نول را بی‌خطر می‌دانند ممکن است در اثر تماس با آن سبب برق‌گرفتگی آنها شده و یا در بعضی موارد منجر به مرگ آنها شود.

### ■ کاهش ایمنی برق‌رسانی به مشترکین :

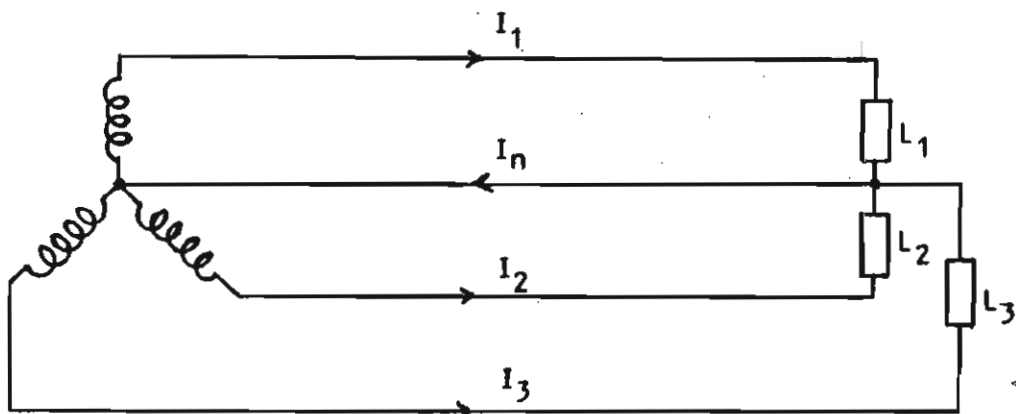
با توجه به مسائل فوق مشاهده می‌شود عدم تعادل بار سبب می‌گردد که مصرف‌کنندگان از يك سیستم ایمنی و مطمئن برخوردار نبوده و این مسئله دقیقاً " در آماری که از شبکه اصفهان توسط گروه‌های ستاد سازندگی و آموزش وزارت نیرو در سال ۱۳۶۰ تهیه شده، بخوبی مشهود می‌باشد.

### ■ اثرات اقتصادی :

با افزایش تلفات در شبکه، افزایش حرارت نیز همراه می‌باشد، لذا از نظر طول عمر تجهیزات و تعمیر و نگهداری آنها، هزینه‌ها افزایش یافته و ضمناً " مقدار زیادی از توان که باید به مصرف‌کنندگان انتقال یابد و به فروش رسد به حرارت تبدیل و تلف می‌شود.

### محاسبه تلفات توان در حالت نامتعادلی بار :

برای سادگی محاسبات ابتدا فرض می‌کنیم که بار در يك نقطه خط مطابق شکل زیر متمرکز باشد. همچنین از مقدار راکتانس خطوط نیز صرف‌نظر می‌شود.



در حالتیکه بار کاملاً " اهمی بوده و ولتاژ و جریان دارای اختلاف فاز صفر باشند، تلفات در سیم های فاز برابر است بنا :

$$\Delta P = RI_1^2 + RI_2^2 + RI_3^2 \quad \text{« حالت نامتعادل »}$$

$$\Delta P = 3RI^2 \quad \text{« حالت متعادل »}$$

و در حالت متعادل می توان نوشت :

$$I = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3}$$

$$\Delta P = \frac{R}{3} (I_1 + I_2 + I_3)^2$$

تفاوت تلفات در حالت متعادل و نامتعادل برابر است با :

$$\begin{aligned} \Delta P_{(نامتعادل)} - \Delta P_{(متعادل)} &= RI_1^2 + RI_2^2 + RI_3^2 - \frac{R}{3} (I_1 + I_2 + I_3)^2 \\ &= \frac{2}{3} R (I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 - I_1I_2 - I_1I_3 - I_2I_3) \end{aligned}$$

چونکه با توجه به نامساوی کوشی همواره رابطه زیر برقرار می باشد.

$$I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 \geq I_1I_2 + I_1I_3 + I_2I_3$$

نامساوی فوق همواره درست است مگر اینکه «  $I_1 = I_2 = I_3$  » باشد، بنابراین تلفات سه فاز در حالت نامتعادل همیشه بیشتر از تلفات سه فاز در حالت متعادل است. این تلفات بدون در نظر گرفتن تلفات سیم نول بوده و چنانچه آن نیز منظور گردیده و سطح مقطع سیم نول نیز برابر فازها در نظر گرفته شود، داریم :

$$\Delta P = RI_n^2 = R (I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 - I_1I_2 - I_1I_3 - I_2I_3)$$

$$\Delta P_{(کل)} = \Delta P_{(فازها)} + \Delta P_{(نول)}$$

$$\Delta P_{(کل)} = R(2I_1^2 + 2I_2^2 + 2I_3^2 - I_1I_2 - I_1I_3 - I_2I_3)$$

$$\text{ازدییاد تلفات} = \Delta P_{(کل)} - \Delta P_{(متعادل)}$$

$$= \frac{5}{3} R (I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 - I_1I_2 - I_1I_3 - I_2I_3)$$

$$= \frac{5}{3} \text{ (تلفات سیم نول)}$$

واگر مقاومت سیم نول دوبرابر سیم فازها باشد (سطح مقطع کوچک باشد که معمولا " هست ) مقدار ازدییاد تلفات بصورت زیر خواهد بود.

$$\text{ازدییاد تلفات} = \frac{4}{3} \text{ (تلفات سیم نول)}$$

البته در این حالت چونکه مقاومت سیم نول دوبرابر شده بنابراین تلفات سیم نول هم دوبرابر خواهد شد و برای جریان ثابت نول  $I_n$  ضریب  $\frac{8}{3}$  می گردد که در مقایسه با  $\frac{5}{3}$  بسیار بیشتر می باشد. در جداول زیر تغییرات تلفات توان برحسب  $\frac{I_n}{I_{متوسط}}$  برای حالتی که سطح مقطع سیم نول برابر سیم فاز با حالتیکه نصف سیم فاز می باشد مقایسه گردیده است.

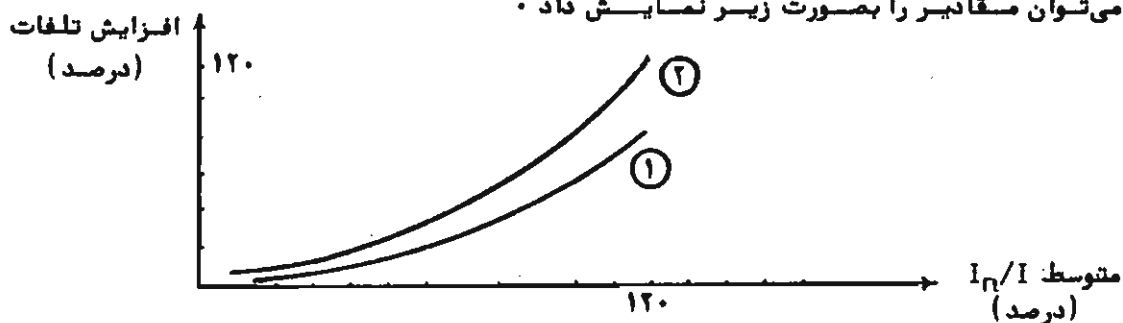
متوسط $I_n/I$	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰	۱۱۰	۱۲۰
افزایش تلفات توان (درصد)	۱/۵	۲	۵	۹	۱۴	۲۰	۲۷	۳۶	۴۵	۵۶	۶۷	۸۰

"حالتی که سطح مقطع سیم نول و سیم فاز یکسان می باشد"

متوسط $I_n/I$	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰	۱۱۰	۱۲۰
افزایش تلفات توان (درصد)	۰/۹	۳/۵	۸	۱۴	۲۲	۳۲	۴۳	۵۷	۷۲	۸۹	۱۰۷	۱۲۸

"حالتی که سطح مقطع سیم نول نصف سیم فاز می باشد"

و می توان مقادیر را بصورت زیر نمایش داد.



این محاسبات فقط برای يك حالت بسیار ساده شبکه در نظر گرفته شده بود و در صورتیکه برای حالت‌های دیگر مانند بار بصورت گسترده در نقاط مختلف نیز محاسبه نمائیم، نتیجه فوق بدست آمده و همیشه مقدار تلفات توان در حالت عدم تعادل بیشتر از حالت تعادل خواهد بود. بدیهی است این نوع محاسبات با دست امکان پذیر نخواهد بود و لازم به محاسبات کامپیوتری مخصوصاً " در حالتی که ضریب قدرت بارهای مختلف نیز متفاوت بوده، می‌باشد. در این مقاله هدف طریقه محاسبه تلفات توان نیست بلکه بررسی احتمالی این تلفات بوده که در شرکت برق منطقه‌ای اصفهان در ماه‌های اسفند، فروردین و اردیبهشت سال ۱۳۶۰ توسط گروه‌های ستاد سازندگی و آموزش بعمل آمده که در جداول و نمودار زیر عرضه گردیده است. لازم بذکر است که این اندازه‌گیریها در شرایط جنگی و در روز انجام شده و بدیهی است در حالت عادی بیشتر می‌باشد.

جدول شماره (۱):

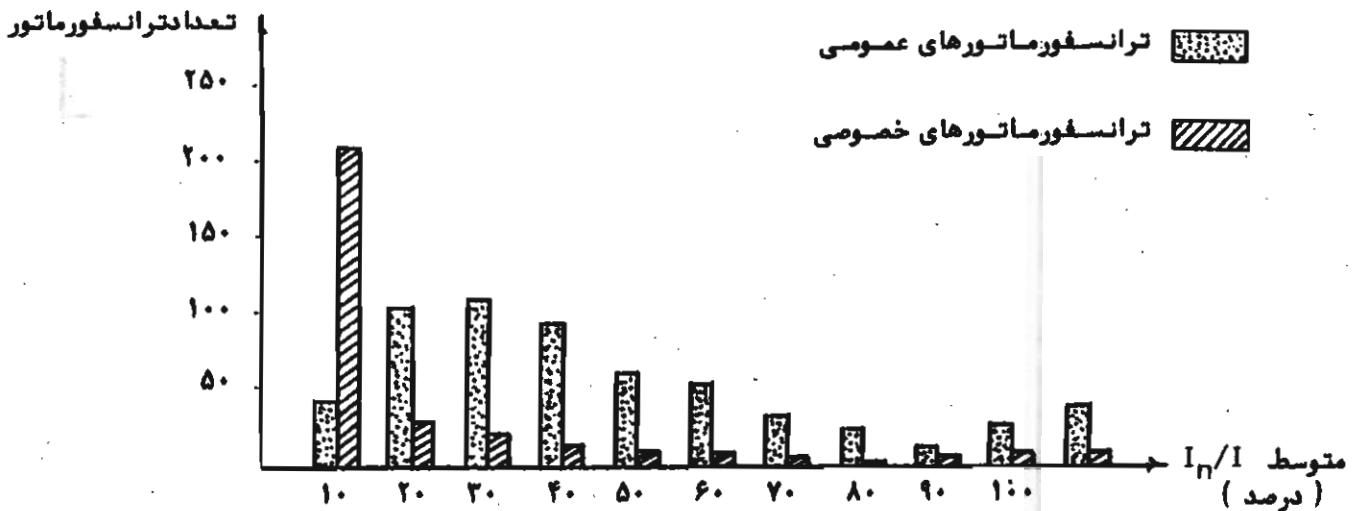
این جدول که با توجه به اندازه‌گیری هائی بر روی ۹۰۰ دستگاه ترانسفورماتور توزیع در ناحیه مرکزی برق منطقه‌ای اصفهان تنظیم یافته بعنوان يك نمونه می‌باشد و در صورتی که برای کلیه برق‌های منطقه‌ای در سطح کشور تهیه گردد اعدادی باور نکردنی بدست خواهد داد که برخوردی جدی و اساسی به این مهم را لازم و ضروری می‌نماید. در این جدول منظور از توان تلف شده میزان ازدیاد تلفات بخاطر عدم تعادل بار بوده و مدت محاسبه برای سه ماه در طول ۲۴ ساعت با نرخ هر KWh انرژی ۴ ریال می‌باشد.

بخش	ازیاد توان تلف شده (KW)	انرژی تلف شده (KWh)	قیمت (ریال)
۱	۱۸۸/۶۸	۱۳۵۸۴۹/۶	۵۴۳۳۹۸/۴
۲	۱۴/۰۴	۱۰۱۰۸/۸	۴۰۴۳۵/۲
۳	۱۸۶/۱۱	۱۳۳۹۹۹/۲	۵۳۵۹۹۶/۸
۴	۲۰۲/۴	۱۴۵۷۲۸	۵۸۲۹۱۲
۵	۴۵۹/۴۷	۳۳۰۸۱۸/۴	۱۳۲۳۲۷۳/۶
۶	۴۰	۲۸۸۰۰	۱۱۵۲۰۰
۷	۱۸۲	۱۳۱۰۶۱/۶	۵۲۴۲۴۶/۴
کابو	۷۴/۲	۵۳۴۲۴	۲۱۳۶۹۶
جمع کل	۱۳۴۶/۹۳	۹۶۹۷۸۹/۶	۳۸۷۹۱۵۸/۴

در این جدول بطور متوسط مقدار درصد  $\frac{I_n}{I_{متوسط}}$  برای ترانسفورماتورهای مختلف عمومی و خصوصی بدست آمده و مقدار درصد افزایش متفاوت نیز بطور تقریبی محاسبه گردیده است .

متوسط $I_n/I$ ( درصد )	ترانسهای عمومی ( تعداد )	ترانسهای خصوصی ( تعداد )	افزایش تلفات ( درصد )
۱۰	۴۷	۲۰۴	۲/۳
۲۰	۱۰۲	۲۴	۴/۴۲
۳۰	۱۱۶	۱۹	۱۰/۸
۴۰	۸۹	۱۱	۱۴
۵۰	۶۴	۱۰	۱۶/۲۸
۶۰	۵۰	۹	۱۸/۸۸
۷۰	۲۵	۵	۱۳/۰۵
۸۰	۲۰	۱	۱۱/۹۷
۹۰	۱۲	۵	۱۲/۲۴
۱۰۰	۲۱	۵	۱۸/۶۷
بیش از ۱۰۰	۳۷	۹	۵۸/۸۸
	۵۸۳	۳۰۲	۲۰/۵۱

و نمودار آن نیز در زیر آورده شده است .



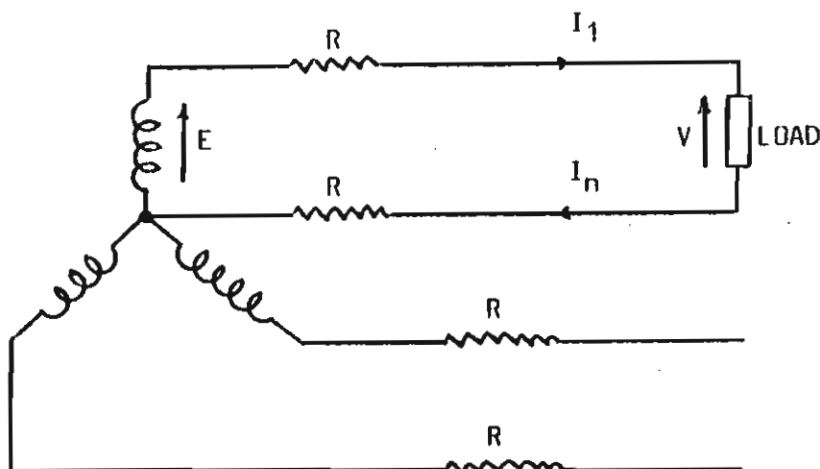
محاسبات و جداول فوق نشان می‌دهد که با افزایش نامتعادلی در سیستم توزیع، تلفات انرژی بمقدار زیادی بالا می‌رود و انرژی تولید شده که باید به مصرف کننده تحویل داده شود، بمقدار زیادی در شبکه از بین رفته و تنها اثرات سوء آن باقی می‌ماند. با توجه به تعداد مصرف کنندگان و اندازه‌گیریهای انجام شده در برق منطقه‌ای اصفهان چنانچه بطور تقریب برای تمامی سطح کشور بمدت یکسال محاسبات انجام پذیرد، مقادیر بصورت زیر خواهد بود.

همانطوریکه گفته شد اندازه‌گیریهای حاصله برای تعداد ۹۰۰ دستگاه ترانسفورماتور در مدت سه ماه اسفند، فروردین و اردیبهشت در موقع روز انجام گرفته و حالا که حدود ۱۲۰۰۰ ترانسفورماتور توزیع در شرکت برق منطقه‌ای اصفهان نصب شده، مقدار کل توان تلف شده برابر ۱۷۹۴۷ کیلووات و برای کل ایران بطور تقریب و با توجه به مصرف کنندگان که در برق منطقه‌ای اصفهان ۸۹۱۰۰۰ و در کل ایران ۹۳،۳۳۹،۰۰۰ می‌باشند، مقدار کل توان تلف شده برابر ۱۸۸،۱۱۱ کیلووات می‌گردد و مشاهده می‌شود حدود ۱۸۸ مگاوات تلفات قدرت بخاطر عدم تعادل بار وجود خواهد داشت.

مقدار کل انرژی تلف شده در شبکه اصفهان برای مدت یکسال با توجه به تعداد ترانسفورماتورهای نصب شده برابر ۵۰۴۲۹ مگاوات ساعت و قیمت آن تقریباً " ۲۰۰ میلیون ریال و برای کل ایران مقدار کل انرژی تلف شده بطور تقریبی ۵۰۴،۲۹۰ مگاوات ساعت که قیمت آن تقریباً " ۲ میلیارد ریال تخمین زده می‌شود. بدیهی است قیمت منظور شده بر اساس کیلووات ساعت ۴ ریال بوده و در صورتیکه استهلاک سرمایه و مقدار سرمایه گذاری وزارت نیرو نیز محاسبه شود، مقدار فوق بسیار زیادتر خواهد بود.

البته قابل ذکر و توجه است که در برق منطقه‌ای اصفهان گروهی تشکیلی و پس از بررسیهای مسئله فوق نسبت به راه حل آن اقدام نمودند و حتی الامکان نسبت به متعادل نمودن فازها بخصوص در موقع پیک بار اقدام گردید که در بسیاری از مواقع اثرات مثبت و نتایج خوبی را بهمراه داشت.

افت ولتاژ در حالت عدم تعادل بار :



در شکل فوق داریم :

$$E = RI_1 + V + RI_2$$

$$= V + R(I_1 + I_2)$$

و در نتیجه ،

$$V = E - R(I_1 + I_2)$$

مشاهده می شود در حالت عدم تعادل بار افت ولتاژ به اندازه  $RI_2$  افزایش می یابد و در صورتیکه سطح مقطع سیم نول نصف سیم فاز باشد به اندازه  $2RI_2$  افزایش می یابد و چنانچه مقدار  $RI_2$  یا  $2RI_2$  که ولتاژ سیم نول می باشد از مقدار ۵۰ ولت که مقدار ولتاژ ایمنی برای انسانها بوده ، تجاوز نماید ممکن است خطرات جانی برای مصرف کنندگان به همراه داشته باشد و در بسیاری موارد سبب مرگ انسانها بشود .  
در صورتیکه بار بصورت مختلط و گسترده در طول خط بخش باشد می توان مقدار افت ولتاژ در شبکه را از رابطه تجربی زیر بدست آورد .

$$V = V_b \left(1 + \frac{4.14}{VN}\right) \left(1 + \frac{12}{DN}\right)$$

$V$  : افت ولتاژ در حالت عدم تعادل بار

$V_b$  : افت ولتاژ در حالت تعادل بار

$N$  : تعداد مصرف کننده های تک فاز مربوط به فازها

$D$  : ماکزیمم دیماند هر مصرف کننده ( بر حسب آمپر )

عدم تعادل بار در شبکه های توزیع خودیکی از معضلات شبکه بوده که متاسفانه از نظرها دور مانده و بطور جدی با آن برخورد نشده و همین امر باعث افزایش هزینه های جاری شبکه های توزیع گردیده و بدنبال آن اثرات نامطلوبی را برای مصرف کنندگان داشته و دارد . در صورتیکه این مشکل حل شود به جای هدر رفتن توان تولیدی می توان به مصرف کنندگان سرویس بهتری را عرضه نموده و از هزینه های ثابت شبکه نیز بهتر استفاده کرد . بجز موارد فوق همانطوریکه ذکر شد تنها افت ولتاژ و افت توان از اثرات سوء نامتعادلی بار نیست بلکه سبب عدم ایمنی سیم نول نیز گردیده که خود از نظر ایمنی انسانها بسیار مهم و در خور تعمق است . بنابراین می بایستی هر چه سریعتر نسبت به رفع این مشکل اقدام نمود و لازم است :

- در هر شرکت برق منطقه ای سیستمی تشکیل و نسبت به اندازه گیری شدت جریان فازها و نول اقدام و میزان عدم تعادل بار محاسبه و بررسی شود .
- نسبت به رفع نامتعادلی شبکه های توزیع اقدام گردد .
- برای ایجاد تعادل تنها می توان از تعادل های موضعی استفاده نموده و در طولهای کوچک این تعادل را برقرار کرد . زیرا در يك شبکه با انواع بارهای صنعتی ، خانگی ، کشاورزی ، تجاری و غیره ایجاد يك تعادل برای کلیه فیـدرها بسیار مشکل است چونکه ضریب همزمانی و استفاده از میزان قدرت هر مشترک در دست نیست ولی می توان این کار را در پستهای ۲۰،۰۰۰/۴۰۰ ولت انجام داد و مصرف کنندگان را طوری بین فازها تقسیم نمود که حتی الامکان عدم تعادل بار حذف شود .
- ضمناً " مشترکین جدید را نیز از طریق فازهای کم بارتر تغذیه نمود که لازمه آن اندازه گیری متناوب بار در فازها و نول می باشد .
- بدیهی است برای نامتعادلی های ناگهانی و زیاد نیز می توان بصورت آنی و ضربتی عمل کرد و امید است با همکاری و همفکری صاحب نظران و متخصصین وزارت نیرو و شرکت های برق منطقه ای نسبت به رفع این مشکل با مطالعه دقیق تر شبکه ، اقدام گردد .