بسمه تعالی

هفتمین کنفرانس شبکه‌های توزیع نیروی برق

انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران

کد مقاله: DNEQ121

نوع پذیرش: رزرو برای ارائه

طراحی و ساخت دستگاه متعادل‌کننده جریان‌های نامتعادل سه فاز

دکتر سیدحسین حسینی
دانشگاه تبریز

مهندس خلیل بانان علی عباسی
مجتمع عالی آموزشی و پژوهشی آذربایجان

کلمات کلیدی : جریانهای نامتعادل ، متعادل کننده ، طراحی و ساخت

خلاصه :

مبحث تلفات انرژی الکتریکی به لحاظ فنی و مالی در کانون توجه متخصصان برق قرار دارد. یکی از عوامل تلفات انرژی و عدم پایداری شبکه های برق رسانی ، نامتعادلی در توزیع بار می باشد. تغییر شکل ولتاژهای خطی و فازی ، پیدایش تلفات آهنی و مسی ترانسفورماتورها، کوتاهی عمر لامپها ، کاهش ضریب بهره لامپها ، تنزل گشتاور راه اندازی ، گشتاور ماکزیمم و افت راندمان موتورهای الکتریکی و ... از جمله مشکلات ناشی از نامتعادلی بار در سیستمهای توزیع می باشد[۱و۲]. برای جبران نامتعادلی بار در سیستمهای توزیع دستگاه متعادل کننده بار طراحی و ساخته شده است که در این مقاله نتایج تئوری و عملی دستگاه فوق بررسی و مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد که با ساخت دستگاه متعادل کننده و قرار دادن آن در شبکه توزیع تا حدود خیلی زیادی می توان نامتعادلی بار را بهبود بخشید.

۱ - مقدمه

جبران بار عبارتست از مدیریت توان راکتیو که به منظور بهبود کیفیت تغذیه در سیستمهای قدرت ac انجام می گیرد. اصطلاح جبران بار در جائی مورد استفاده قرار می گیرد که مدیریت توان راکتیو برای یک بار تنها یا گروهی از بارها انجام می گیرد. در جبران بار اهداف سه گانه زیر مد نظر می باشد :

۱- اصلاح ضریب توان

۲- بهبود تنظیم ولتاژ

۳- متعادل کردن بار

از اهداف سه گانه فوق مورد اول و دوم یک بحث کلی بوده و با روشهای متعددی می توان آن اهداف را بررسی کرد[۳ و ۴ و ۵] . متعادل کردن بار یا هدف سومی که در بحث جبران بار مد نظر می باشد از این نظر که اکثر سیستمهای قدرت سه فاز بوده و برای عملکرد متعادل طراحی می شوند یک بحث خیلی مهم وجدی می باشد.

عملکرد نامتعادل بار منجر به ایجاد مولفه های جریان توالی صفر و منفی می گردد که این گونه جریانها اثرات نامطلوبی چون ایجاد تلفات اضافی در انواع تجهیزات ، اشباع ترانسفورماتورها ، جریان اضافی سیم زمین و ... را به دنبال خواهد داشت[۲].

یک جبران کننده ایده آل وسیله ای است که در نقطه تغذیه متصل و وظایف سه گانه زیر را به عهده داشته باشد.

۱- ضریب قدرت را به واحد برساند .

۲- تغییرات ولتاژ را حذف و یا مقدارش را به یک سطح قابل قبولی برساند.

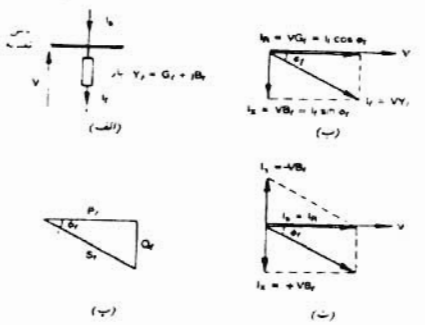
۳- جریانها و ولتاژهای سه فاز را در محل تغذیه متعادل نماید.

نمونه بارهائی که به جبران بار نیاز دارند عبارتند از : کوره های الکتریکی ، کوره های القائی ، دستگاههای جوش الکتریکی و القائی ، انواع دستگاهای غلطک برای شکل دادن فلزات ، سیبک سازی ، دستگاههای چوب بری ، سنگ بری ، دستگاههای مخصوص حفاریها و معادن و ...

۲- تئوری اساسی جبران بار

۲-۱ - اصلاح ضریب توان

شکل شماره (۱) یک بار تک فاز با ادمیتانس $Y_l = G_l + B_l$ را که از ولتاژ V تغذیه می شود نشان میدهد.



شکل (۱) - الف) مدل بار تک فاز ب) دیاگرام برداری قبل از جبران پ) دیاگرام توان ت) دیاگرام برداری بعد از جبران

با توجه به شکل فوق جریان بار I_l برابر است با :

(۱)

$$I_1 = V(G_1 + jB_1) = V.G_1 + JV.B_1 = I_R + jI_X$$

اگر زاویه V و I_l برابر فرض شود خواهیم داشت :

(۲)

$$S_1 = V.I_1^* = V^2.G_1 - jV^2.B_1 = P_1 + jQ_1$$

اصلاح ضریب قدرت همان جبران توان راکتیو بوده و با موازی کردن یک جبران کننده با ادمیتانس راکتیو خالص $-jB_1$ مشکل حل می شود[۲]. در این بحث جریان جبران کننده از رابطه زیر به دست می آید :

$$I_Y = V.Y_Y = -jV.B_1 \qquad (۳)$$

با توجه به بررسی های فوق می توان گفت که جبران کننده اصلاح ضریب توان تنها یک ادمیتانس می باشد که بسته به شرایط اقتصادی و منطقه ای می تواند به صورت ثابت , پله ای و یا پیوسته طراحی و نصب گردد.

۲-۲ – تنظیم ولتاژ

تنظیم ولتاژ را می توان به صورت تغییر مقدار ولتاژ تغذیه در ازاء تغییرات معینی از جریان بار تعریف کرد تغییرات ولتاژ از افت ولتاژ روی امپدانس سیستم تغذیه حاصل می شود.

اگر سیستم تغذیه توسط مدار معادل تونن مطابق شکل (۲) نمایش داده شود. می توان تنظیم ولتاژ را از رابطه زیر به دست آورد :

(٤)

$$\%R_{eg} = \frac{|E| - |V|}{|V|} = \frac{|E| - V}{V}$$

افت ولتاژ ناشی از جریان بار(I_l)روی امپدانس سیستم تغذیه از رابطه زیر به دست می آید :

(٥)

$$\Delta V = E - V = Z_S I_1$$

و می توان نشان داد که :

(٦)

$$\Delta V = \Delta V_R + j\Delta V_X$$

که در این رابطه داریم :

$$\Delta V_R = \frac{R_S P_1 + X_S Q_1}{V} \qquad (۷)$$

(۸)

$$\Delta V_X = \frac{X_S P_1 - R_S Q_1}{V}$$

با توجه به این روابط می توان با اضافه کردن یک جبران کننده به موازات بار رابطه فوق را برقرار کرد. در این صورت می توان نشان داد که :

(۹)

$$|E|^2 = (V + \frac{R_S P_1 + X_S Q_S}{V})^2 + (\frac{X_S P_1 - R_S Q_S}{V})^2$$

که در این رابطه :

$$a = R_S^2 + X_S^2 \qquad b = 2.V^2.X_S$$
$$c = (V^2 + R_S P_1)^2 + X_S^2 P_1^2 - E^2 V^2$$

بعد از حل معادله شماره (۱۰) داریم :

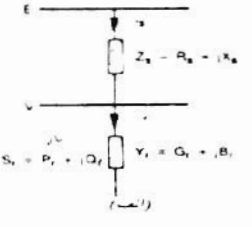
$$Q_S = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \qquad (۱۱)$$

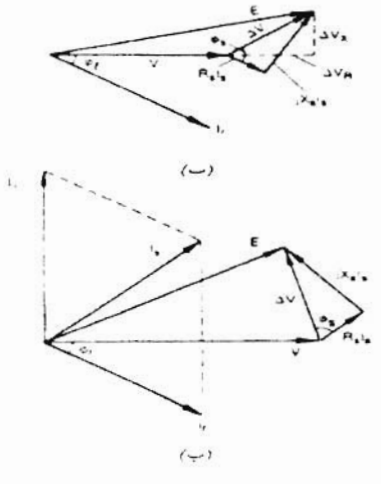
بنابراین می توان نتیجه گرفت که یک جبران کننده راکتیو خالص قادر خواهد بود که تغییرات ولتاژ تغذیه را که در اثر توان اکتیو و راکتیو بار به وجود می آید جبران نماید.

با توجه به بحث قبلی و بحث فوق می توان نتیجه گرفت که اصلاح هم زمان ولتاژ و ضریب توان امکانپذیراست ولی اصلاح و تنظیم برای دو مقدار مشخص مشکل است مگر در صورتی که قدرت اکتیو صفر باشد که این، حالت عملی ندارد.

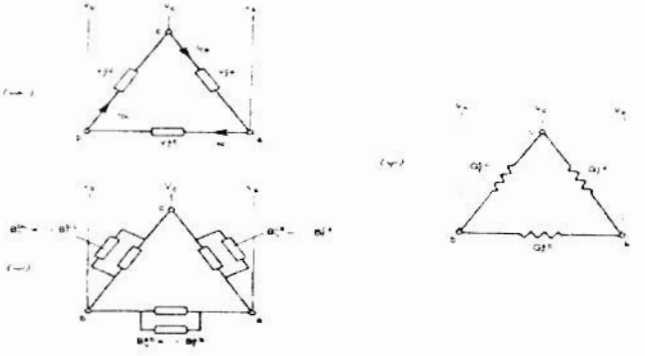
۳-۲ – جبران نامتعادلی بار

در این بررسی فرض می شود که ولتاژهای تغذیه متعادل بوده و تغییرات بار به حد کافی کند می باشد. شکل (۳ – الف) حالت کلی یک بار مختلط و نامتقارن را که نمودی از جریانهای نامتعادل می باشد نشان می دهد. جبران کننده بار آیده آل را می توان به صورت شبکه ادمیتانس سه فاز پس فاز تصور کرد که وقتی موازی بار قرار می گیرد یک بار واقعی و متقارن را به سیستم تغذیه عرضه می کند. این موضوع در شکل (۳ – ب و پ) نشان داده شده است.





شکل (۲) – الف) مدل بارو مدار معادل نوین سیستم تغذیه ب) دیاگرام برداری قبل از جبران
پ) دیاگرام برداری بعد از جبران



شکل ۳- الف) یک بار مثلث سه فاز نامتقارن ب) مدل ادمیتانسی بار سه فاز و جبران آن
پ) نتیجه جبران بار

در این شکل ادمیتانس بار با Y_l^{ab} ، Y_l^{bc} و Y_l^{ca} نمایش داده شده که هر کدام از ادمیتانسهای فوق را می توان به مقدار کندوکتانس و سوسپتانس به فرم زیر بیان نمود

$$Y_l^{ab} = G_l^{ab} + jB_l^{ab} \qquad (۱۲)$$

می توان نشان داد که برای جبران ایده آل بار می توان از سه سوسپتانس بر حسب مقادیر بار به شکل زیر استفاده کرد. [3]

$$B_y^{ab} = -B_l^{ab} + (G_l^{ca} - G_l^{bc})/\sqrt{3} \qquad (۱۳)$$
$$B_y^{bc} = -B_l^{bc} + (G_l^{ab} - G_l^{ca})/\sqrt{3}$$
$$B_y^{ca} = -B_l^{ca} + (G_l^{bc} - G_l^{ab})/\sqrt{3}$$

در رابطه فوق مقادیر فوق سوسپتانس جبران کننده بر حسب مقادیر ادمیتانس بار بیان شده است که در طراحی و ساخت جبران کننده خیلی ساده و راحت قابل استفاده نخواهد بود. اگر بتوان رابطه ای را به دست آورد که در آن مقادیر مطلوب سوسپتانس جبران کننده بر حسب مقادیر ولتاژ یا جریان بیان شده باشد در طراحی و ساخت جبران کننده خیلی مفید خواهد بود.

با تحلیل بار نامتقارن بر حسب جریانها و ولتاژهای واقعی خط می توان مقادیر مطلوب سوسپتانس جبران کننده را بر حسب مقادیر ولتاژها و جریانها به دست آورد [2]. روابط زیر مقادیر مطلوب سوسپتانس جبران کننده را بر حسب جریانهای فازوری خط به دست می دهد

(۱۴)

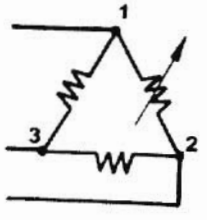
$$B_y^{ab} = -\frac{1}{3V}[I_m.I_{al} + I_m.h.I_{bl} - I_m.h^2.I_{cl}$$
$$B_y^{bc} = -\frac{1}{3V}[I_m.h.I_{bl} + I_m.h^2.I_{cl} - I_m.I_{al}$$
$$B_y^{ca} = -\frac{1}{3V}[I_m.h^2.I_{cl} + I_m.I_{al} - I_m.h.I_{cl}$$

در این رابطه I_{al} ، I_{bl} و I_{cl} جریانهای فازوری خطوط سه فاز بوده و $h = e^{j2\Pi/3}$ می باشد.

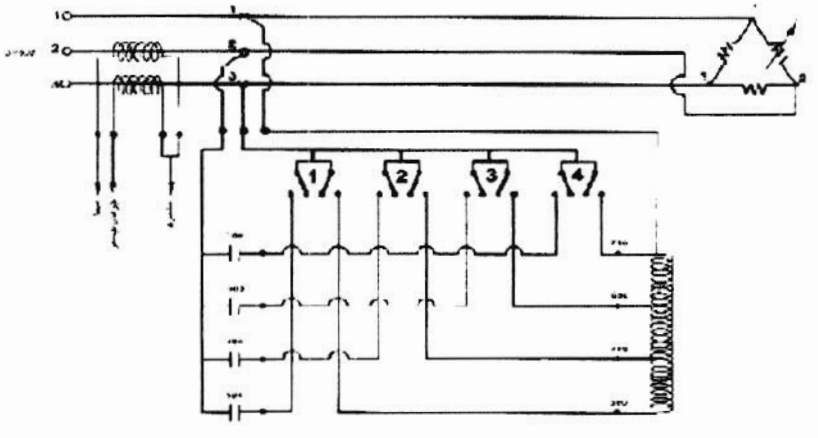
۳- طراحی و ساخت متعادل کننده جریان

برای طراحی دستگاه متعادل کننده جریان از معادلات شماره (۱٤) استفاده شده است. برای این کار و بر اساس معادلات مذکور با توجه به اندازه گیری های لازم از جریانهای فازها مقدار سوسپتانس مورد نیاز هر فاز محاسبه و توسط یک مدار کنترل به سیستم اضافه می گردد. شکل شماره (٤) مدار قدرت دستگاه متعادل کننده در یک فاز را به صورت شماتیک نشان می دهد. در ساخت دستگاه مذکور از دو ترانس جریان برای اندازه گیری جریان فازها استفاده شده و این جریانها پس از یک سو سازی و فیلتر شدن به عنوان مبنائی برای عمل سویچ زنی المانهای پسیو مورد استفاده قرار می گیرند.

در این دستگاه با توجه به میزان نامتعادلی بار از چها ر مرحله کلیدزنی برای وارد کردن المانهای پسیو استفاده شده است برای محاسبه مقادیر سوسپتانس مورد نیاز در نامتعادلیهای مختلف و تعیین سوسپتانس مورد نظر با توجه به امکانات موجود با ایجاد یک بار نامتعادل درحالتهای مختلف طبق شکل (۵) آزمایشاتی انجام و نتایج تست به همراه نتایج محاسبات تئوریک و انتخاب سوسپتانس در جدول شماره (۱) آورده شده است.



شکل شماره (۵) - دیاگرام آزمایش یک بار نامتعادل (بارهای متصل به ۱-۳ و ۳-۲ یکسان و مساوی ۲ کیلووات و بار متصل به ۱-۲ متغیر میباشد)



شکل (٤) – شکل شماتیک دستگاه متعادل کننده جریان یک فاز

جدول شماره (۱) : مقادیر جریان فازها ، سوسپتانس محاسبه شده و سوسپتانس انتخابی برای یک بار نامتعادل

بار (کیلو وات) L_{12} L_{23} L_{31}			جریان فازها (آمپر)			مقادیر سوسپتانس فازها											
						خازن وار						سلف (وار)					
						محاسبات تئوریک			ظرفیت موجود			محاسبات تئوریک			ظرفیت موجود		
			I_1	I_2	I_3	L_{12}	L_{23}	L_{31}	L_{12}	L_{23}	L_{31}	L_{12}	L_{23}	L_{31}	L_{12}	L_{23}	L_{31}
0/4	2	2	10/1	10/2	15/7		-942			-900				942			900
0/6	2	2	10/7	10/8	15/7		-807			-750				807			750
0/8	2	2	11/5	11/5	15/8		-690			-750				690			750
1	2	2	11/9	12	15/6		-376			-600				576			600
1/2	2	2	12/7	12/8	15/7		-461			-450				461			450
1/4	2	2	13/4	13/5	15/7		-345			-300				345			300
1/6	2	2	14/1	14/2	15/7		-180			-150				180			150

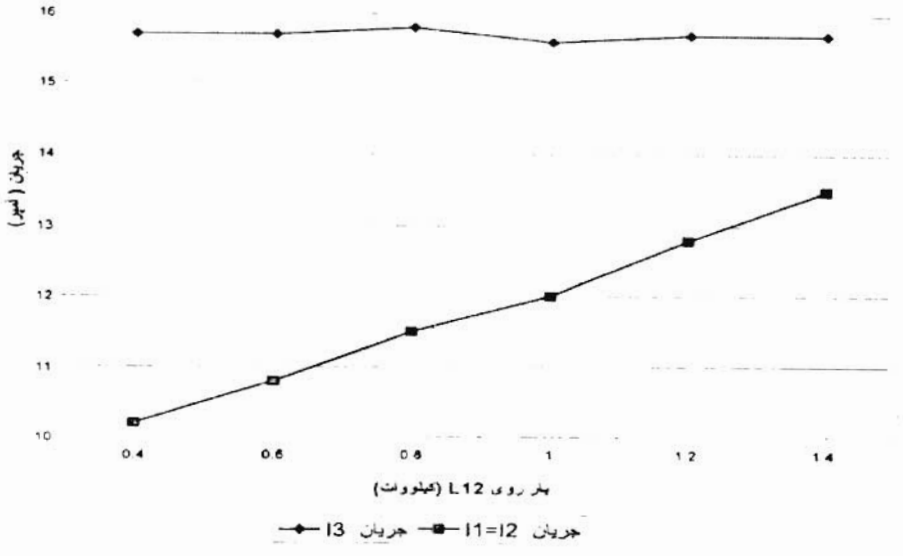
با توجه به اطلاعات جدول فوق و محدودیتهای موجود در طراحی وساخت امکان جبران صددرصد بار وجود ندارد ولی اگر امکان دسترسی به المانهای سلف و خازن با تغییرات پیوسته وجود داشته باشد جبران صددرصد بار نیز امکان پذیر خواهد شد.

برای بررسی عملکرد دستگاه ساخته شده یک بار نامتقارن در دو حالت با و بدون دستگاه متعادل کننده مورد تست قرار گرفت که نتایج جریانهای قرائت شده خطوط سه فاز در دو حالت مذکور در جدول شماره (۲) آورده شده است.

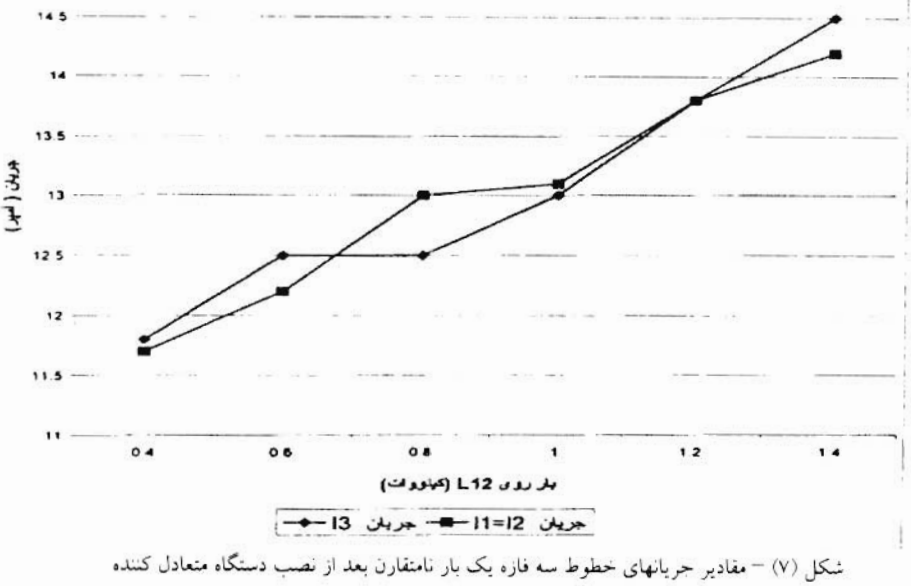
جدول (۲) – جریانهای خطوط سه فاز برای بارهای نامتقارن قبل و بعد از نصب دستگاه متعادل کننده بار

ردیف	بار (کیلو وات)			جریان خطوط قبل از نصب دستگاه متعادل کننده بار			جریان خطوط بعد از نصب دستگاه متعادل کننده بار		
	L_{12}	L_{23}	L_{31}	I_1	I_2	I_3	I_1	I_2	I_3
۱	0/4	2	2	10/1	10/2	15/7	11/7	11/7	11/8
۲	0/6	2	2	10/7	10/8	15/7	12/1	12/2	12/5
۳	0/8	2	2	11/5	11/5	15/8	13	13	12/5
٤	1	2	2	11/9	12	15/6	13/1	13/1	13
٥	1/2	2	2	12/7	12/8	15/7	13/7	13/8	13/8
٦	1/4	2	2	13/4	13/5	15/7	14/1	14/2	14/5
۷	1/6		2	14/1	14/2	15/7	14/4	14/5	14/7

برای تفهیم بهتر تاثیر نصب دستگاه متعادل کننده بار روی جریانهای نامتعادل، تغییرات جریانهای خطوط سه فازه قبل و بعد از نصب دستگاه مذکور به ترتیب در شکلهای شماره (٦) و (٧) آورده شده است.

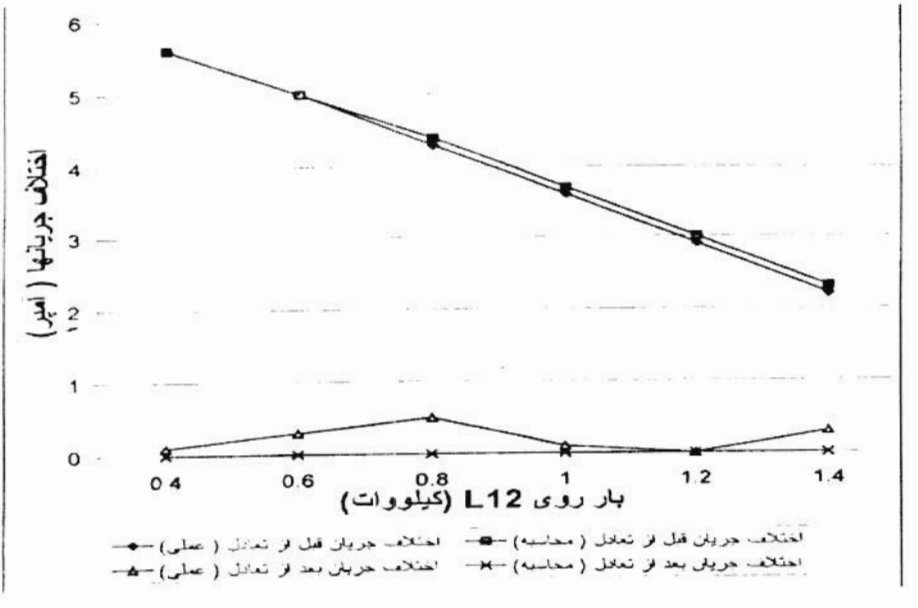


شکل (٦) – مقادیر جریانهای خطوط سه فازه یک بار نامتقارن قبل از نصب دستگاه متعادل کننده



شکل (٧) – مقادیر جریانهای خطوط سه فازه یک بار نامتقارن بعد از نصب دستگاه متعادل کننده

با توجه به اطلاعات موجود در جدول شماره ۲ و شکلهای شماره (٦) و (۷) تاثیر نصب دستگاه ساخته شده در جبران نامتعادلی بار کاملا" معلوم است. در نامتقارنی شدید در ردیف (۱) جدول حداکثر اختلاف جریان فازها ٥,٦ آمپر می باشد که با نصب دستگاه متعادل کننده حداکثر اختلاف جریان به ۰,۱ آمپر کاهش می یابد.به عبارت دیگر حدود ۹۸% جبران بار انجام شده است . در شرایط نا متقارنی کمتر در ردیف (۷) جدول حداکثر اختلاف جریان فازها ۱,٦ آمپر می باشد که با نصب دستگاه متعادل کننده حداکثر جریان به ۰,٦ آمپر کاهش می یابد و یا به عبارت دیگر حدود ۸۱% جبران بار انجام شده است. منحنی شکل (۸) اختلاف جریان خطوط سه فازه را در دو حالت قبل و بعد از نصب دستگاه و بازای تغییرات نامتقارن بار نشان می دهد. با توجه به شکل (۸) احتلاف جریان فازها بعد از نصب دستگاه فوق به دلیل پله ای بودن عملکرد المانهای پسیو در تمام نقاط صددرصد نبوده و این امر به خاطر اختلاف سوسپتانس واقعی مورد نیاز و سوسپتانس موجود در دستگاه می باشد.



شکل (۸) – حداکثر اختلاف جریان فاز قبل و بعد از نصب دستگاه متعادل کننده

نتیجه گیری :

نتایج به دست آمده از تست دستگاه متعادل کننده بار نشان می دهد که تا حدود خیلی زیادی می توان با نصب دستگاهی مشابه دستگاه فوق نامتقارنی بار را در سیستمهای توزیع جبران کرد و با توجه به این که متعادل کردن بار فازها در مقایسه با ایجاد تاسیسات عمده نیروگاهی و شبکه های انتقال نیاز چندانی به منابع مالی و تجهیزات کلان ندارد , شرکتهای توزیع با راههای عملی و سهل الوصول و با تجهیز کادر فنی و رسیدگی به شبکه ها تا اندازه قابل قبولی می توانند با تقسیم مناسب مصرف کننده ها روی فازها و نصب دستگاههای متعادل کننده بار به مشابه دستگاه ساخته شده فوق , تعادل لازم در توزیع بار را انجام دهند.

نهایتا" می توان پیشنهاد کرد که دولت در تصمیم گیریهای کلان و استراتژیک خود می تواند نصب دستگاههای متعادل کننده را برای بعضی از مصرف کننده ها مانند پاساژها مجتمعهای آپارتمانی و یا صنایع خاصی که قبلا" نیز به آنها اشاره شده است اجباری نماید که این امر در متعادل سازی بار بسیار موثر بوده و تبعات منفی آن را نیز کاهش می دهد.

مراجع :

۱- دکتر رضا قاضی –دانشگاه فردوسی مشهد "طراحی و ساخت کنترل کننده توان راکتیو جهت بهبود راه اندازی موتورهای القائی ،بهبود ولتاژ شبکه تغذیه و صرفه جوئی در مصرف انرژی الکتریکی" پنجمین کنفرانس سراسری شبکه های توزیع نیروی برق سال ۱۳۷٤

۲- کتاب "کنترل توان راکتیو در سیستمهای الکتریکی"
تالیف : تی – جی – ای – میلر ترجمه : دکتر رضا قاضی – سال ۱۳۷٤

3-CZARNECKI , L. S. :"Considerations on the reactive power in nonsinusoidal situations" , IEEE Trans , 1985 , IM – 34 , (3) , pp. 399 – 404.

4- CZARECKI , L. S. :" Orthogonal decomposition of the currents in a 3 – phase non – linear asymmetrical circuit with nonsinusoidal voltage source" , IEEE Trans. , 1987 , IM – 37 , (1) , pp. 30 - 34

5- CZARNECKI , L. S. :" Minimization of reactive power under nonsinusoidal condition" , IEEE Trans. , 1987 , IM. 36 , (1) , pp. 18 – 22.

6- CZARNECKI , L. S. :" Minimization of unbalanced and reactive currents in three – phase asymmetrical circuits with nonsinusoidal voltage" , IEE , Proc. , 1992 , vol. 139 , No. 4 pp. 347 – 354.