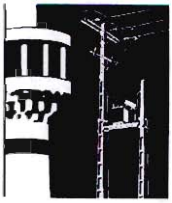


پنجمین کنفرانس شبکه‌های توزیع نیروی برق

بارگیری بهینه از ترانسفورماتورهای توزیع

رضا وفائی ـ کریم روشن میلانی ـ هادی خسروی

شرکت توزیع نیروی برق آذربایجان‌شرقی

چکیده:

کم توجهی به تلفات در ترانسفورماتورهای توزیع و عدم دقت در انتخاب مناسب ظرفیت ترانس و بهره‌برداری ناصحیح از آنها به عنوان آخرین نقطهٔ تحویل انرژی، بسیار گران تمام خواهد شد. زیرا ارزش انرژی متناسب با موقعیت مکانی مصرف‌کنندگان و با دورتر شدن از منبع تولید، شامل تمامی هزینه‌های شبکه و تجهیزات مسیر و کار نیروی انسانی و سرمایه‌گذاری در بخش تولید و انتقال نیز می‌باشد.

طراحی و انتخاب اصولی قدرتهای منصوبه برای ترانسهای توزیع و استفاده از بهترین حالت انتقال انرژی هدف این مقاله می‌باشد. که در آن نتایج اندازه‌گیری پیک‌بار مصرفی کلیهٔ پستهای توزیع آذربایجان‌شرقی در بهار ۱۳۷۳ به عنوان یک نمونه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

شرح مقاله :

چشم‌انداز تحولی که در مقابل صنعت برق و بطور کلی انرژی گسترده است خصوصیات اقتصادی و فنی ویژه‌ای را دارا می‌باشد که دیگر امکان گشاده دستی‌های بی‌رویه در گسترش صنعت برق را نمی‌دهد. در این راستا مراکز مطالعاتی مختلف، فعالیتهای قابل توجهی در بخش تولید و انتقال بعمل می‌آورند تا هر کیلووات ساعت انرژی تولید شده به حداقل قیمت ممکن در محل مناسب به شبکه توزیع تحویل داده شود. ولی متأسفانه در بخش توزیع علیرغم بینش‌های چند سال اخیر مبنی بر خصوصی کردن آن که به منظور حداقل نمودن هزینه‌ها پایه‌گذاری شده است، توجه قابل ملاحظه‌ای به تحول کیفی و مصرف بهینه انرژی و تقلیل تلفات بعمل نیامده است.

در شبکه‌های بزرگ توزیع بسیار ارزشمند است که در پیدا کردن نحوهٔ تغذیه مناسب به منظور کاهش تلفات کوششهای لازم بعمل آید. زیرا به عنوان نمونه بهبود حتی مقدار ۰/۵٪ در بازده شبکه آذربایجان، موجب تقلیل میزان متجاوز از ۱۷۰ میلیون کیلووات ساعت تلفات انرژی خواهد بود که این انرژی صرفه‌جویی شده بیش از مصرف سالیانه مرکز استان اردبیل با بخشهای تابعهٔ آن می‌باشد [1].

ترکیب بهینه یک سیستم تغذیه بطور کلی با انتخاب مناسب قدرت ترانسفورماتورها و تعداد آنها و ملحوظ نمودن پارامترهائی نظیر: ضریب‌بار منطقه، شاخص رشد مصرف سالیانه، ضریب همزمانی، عمر مفید تجهیزات، طول فیدرهای فشار ضعیف و سطح مقطع مناسب آنها و چگالی‌بار منطقه و ... تحقق‌پذیر خواهد بود. در این صورت هزینهٔ کلی ترانسفورماسیون و سرمایه‌گذاری حداقل بوده از تلفات انرژی نیز می‌توان کاست.

در بررسی‌های آماری بعمل آمده که بر روی ترانسهای زمینی شبکه توزیع آذربایجان‌شرقی انجام گرفته است قدرت نصب شده و اختلاف آن با قدرت مصرفی پیک‌بار مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. برای استفاده هر چه بهتر از این نتایج، سعی شده است در بررسی خود مبدأ مقایسه‌ای بین حالت بازده ماکزیمم و استفاده بهینهٔ ترانس را با شرایط فعلی‌بار مصرفی منطقه مد نظر قرار داده و اقتصادی‌ترین سیستم را پیشنهاد نمائیم.

۱ ـ بازده ترانسفورماتورها :

اهمیت بررسی بازده[1] (راندمان) ترانسفورماتورها را می‌توان مبناء شروع برای تعیین بهترین حالت انتخاب ترانس بکار برد و در ادامه به بیشترین بازده انتقال انرژی نایل آمد. بازده ترانس از نقطه نظر توزیع را طبق تعریف می‌توان:

نسبت توان تحویل داده شده «طرف مشترکین» به توان گرفته شده «از طرف شبکه» تعریف کرد. هر چقدر این بازده بیشتر باشد کارآئی و استفاده از ترانس در انتقال توان بیشتر خواهد بود. [2]

$$\text{بازده } \% = \eta_p = \frac{\text{توان مفید [W]}}{\text{تلفات [W]} + \text{توان مفید [W]}} \times ۱۰۰ \qquad : (۱)$$

کل تلفات مجموع تلفات آهنی (بی‌باری) و تلفات مسی (بارداری یا اتصال کوتاه) ترانسفورماتور می‌باشد. در ولتاژ و فرکانس ثابت تلفات بی‌باری ترانسها که شامل تلفات هیسترزیس و تلفات جریان فوکو می‌باشد ثابت است، ولی تلفات بارداری ناشی از مقاومت اهمی اولیه و ثانویه، با توان دوم نسبت جریان مصرف به جریان نامی متناسب می‌باشد و چون پیک‌بار عبوری از ترانسفورماتورها به نسبت «ضریب بارگیری» "N" از ظرفیت آن می‌باشد [3]:

$$\eta_p = \frac{V_2 I_2 \, Cos\phi}{V_2 I_2 \, Cos\phi + [P_i] + N^2 [P_c]} \qquad : (۲)$$

حالتی که در آن بازده ترانس بیشترین مقدار خود را دارد برابر شدن تلفات بی‌باری [آهنی] با تلفات بارداری [مسی] اثبات شده است [2 و 3]. بنابراین می‌توان درصد بارگیری در بیشترین بازده (راندمان ماکزیمم) ترانس «N_M» را بدست آورد:

$$\%N_M = \sqrt{\frac{\text{تلفات آهنی}}{\text{تلفات مسی}}} \times ۱۰۰ \qquad : (۳)$$

با استفاده از کاتالوگ مشخصات فنی ترانسفورماتورهای ساخت داخل [4 و 5] و روابط (۲) و (۳) می‌توان جدول شماره (۱) را استنتاج نمود که در آن درصد بارگیری ترانسهای توزیع برای بیشترین بازده توان در حالتی که جریان‌بار بطور دائم مقدار ۳۶٪بار نامی باشد، بدست می‌آید. [$N_M = \sqrt{\frac{۰/۲}{۱/۵}} \times ۱۰۰ = ۳۶$] و مقدار بازده ماکزیمم در این موقعیت ۹۹/۶٪ خواهد بود.

---

1 - Efficiency.

جدول شماره (۱) : مشخصات فنی ترانسفورماتورهای توزیع پستهای زمینی

قدرت ترانس	تلفات بی‌باری (آهنی)		تلفات بارداری (مسی)		درصد بارگیری	بازده توان	
P_T	P_f	$nl_{p.u}$	P_c	$ll_{p.u}$	بازده ماکزیمم	ماکزیمم	بار کامل
					N_M	$\eta_p\|_{N=۰/۳۶}$	$\eta_p\|_{N=۱}$
[KVA]	[W]	[%]	[W]	[%]	[%]	[%]	[%]
۲۵۰	۶۱۰	۰/۲۴	۴۴۵۰	۱/۷	۳۷	۹۹/۵	۹۸
۳۱۵	۷۲۰	۰/۲۳	۵۴۰۰	۱/۷	۳۶	۹۹/۵	۹۸
۴۰۰	۸۵۰	۰/۲۱	۶۴۵۰	۱/۶	۳۶	۹۹/۶	۹۸/۲
۵۰۰	۱۰۰۰	۰/۲۰	۷۸۰۰	۱/۶	۳۶	۹۹/۶	۹۸/۳
۶۳۰	۱۲۰۰	۰/۱۹	۹۳۰۰	۱/۵	۳۶	۹۹/۶	۹۸/۳
۸۰۰	۱۴۵۰	۰/۱۸	۱۱۰۰۰	۱/۴	۳۶	۹۹/۶	۹۸/۴
۱۰۰۰	۱۷۵۰	۰/۱۸	۱۳۵۰۰	۱/۴	۳۶	۹۹/۶	۹۸/۵
۱۲۵۰	۲۱۰۰	۰/۱۷	۱۶۴۰۰	۱/۳	۳۶	۹۹/۷	۹۸/۵
۱۶۰۰	۲۵۵۰	۰/۱۶	۱۹۸۰۰	۱/۲	۳۶	۹۹/۶	۹۸/۶
مقدار متوسط :		۰/۲۰		۱/۵	۳۶	۹۹/۶	۹۸/۴

با بررسی جدول فوق ضرورت بازنگری و توجه به طراحی و اصول ساخت ترانسهای توزیع ساخت داخل وکمترکردن مقادیر تلفات مسی آنها مشخص می‌گردد تا بدینوسیله ضمن کاهش تلفات امکان بارگیری بیشتر در راندمان ماکزیمم ترانسها نیز فراهم گردد. از طرفی حالت بارداری ترانسها را شبکه‌های توزیع در یک دورهٔ زمانی به عنوان نمونه در یک شبانه‌روز، به علت وضعیت منحنی‌بار مصرفی، دیگر بازدهٔ توان ترانسفورماتورها مورد کاربرد نمی‌باشد. در کاربرد عملی برای تعیین ایده‌آل‌ترین بارگیری دو روش تجزیه و تحلیل دیگر وجود دارد [6]. روش اول پیدا کردن بازده انتقال انرژی ترانسفورماتورها و روش دوم تعیین اقتصادی‌ترین حالت بارگیری در موقع انتخاب و نصب ترانس «که بطور منطقی نیز مناسب‌تر است» می‌باشد. این دو روش نتایج نزدیکی با اصول بارگیری از ترانسفورماتورها در استاندارد بین‌المللی IEC را دارند [8].

۲ ـ بازده انتقال انرژی :

برای یک دوره زمانی مشخص "h" بازده انتقال انرژی در ترانس نشان‌دهندهٔ نسبت انرژی انتقال یافته به انرژی ورودی در آن مدت می‌باشد.

هر چقدر تلفات کل که مجموع تلفات بی‌باری و بارداری است کمتر باشد مقدار انرژی ورودی کمتری برای انتقال انرژی مورد نظر لازم است.

$$\eta_e = \frac{\text{انرژی خروجی از ترانسفورماتور در زمان h}}{\text{انرژی ورودی به ترانسفورماتور در زمان h}} \qquad : (۴)$$

از آنجائی که طرف فشارقوی ترانسها همواره تحت ولتاژ می‌باشد تلفات انرژی بی‌باری آنها ثابت است در صورتی که تلفات بارداری به علت تغییرات جریان مصرف‌کنندگان و تنوع آنها متغیر خواهد بود.

مشخصهٔ منحنی‌بار هر منطقه در قالب پارامتر «ضریب‌بار» "LF" نشان داده می‌شود که آنرا می‌توان ضریب‌بار متوسط کل ترانسهای آن منطقه فرض نمود زیرا زمان وقوع پیک‌بار ترانس با پیک‌بار متوسط مصرف، منطبق خواهد بود. رابطهٔ فوق را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\eta_e = \frac{V_2 I_2 \times LF \times Cos\phi \times h}{V_2 I_2 \times LF\, Cos\phi \times h + [P_f] \times h + N^2 [P_c \times (LF)^2] \times h} \qquad : (۵)$$

از جدول (۱) می‌توان برای هر کیلوولت آمپر قدرت نصب شده ترانس "P_T" تلفات بارداری و بی‌باری را برحسب درصد متوسط تلفات نشان داد با فرض اولیهٔ $Cos\phi = 1$ و $P_L = N P_T$ «P_L قدرت‌بار مصرفی»، نتیجه می‌شود:

$$\eta_e = \frac{P_L \times LF \times h}{P_L \times LF \times h + [nl_{p.u} \times P_T] h + N^2 [ll_{p.u} \times P_T \times (LF)^2] \times h} \qquad : (۶)$$

برای رسیدن به بیشترین بازده انتقال انرژی «Max η_e» در مدت زمان h آن درصد بارگیری مورد نظر است "N_c" که تلفات انرژی بارداری را با تلفات بی‌باری برابر کند:

$$\% N_c = \sqrt{\frac{nl_{p.u}}{ll_{p.u} \times (LF)^2}} \times ۱۰۰ \qquad : (۷)$$

با بررسی انجام شده بر روی شبکه توزیع آذربایجان بهترین درصد بارگیری از ترانسها با اعمال ضریب‌بار منطقه به میزان LF = ۰/۵۱ مقدار ۶۷٪ نتیجه می‌گردد.

با اعمال $Cos\phi$ واقعی شبکه، راندمان کاهش خواهد یافت زیرا از یک طرف قدرت قابل مصرف توسط‌بار [KW] ، $P_L = V_2 I_2 \times Cos\phi$ کاهش یافته و از طرف دیگر تلفات بارداری و

بی‌باری افزایش خواهد یافت[1] [6].

از بحث فوق به مواردی از اهمیت توجه به مدیریت بار نیز می‌توان اشاره کرد. زیرا هر چه منحنی مشخصهٔ‌بار "LF" و ضریب قدرت "Cosϕ" اصلاح شود مقدار کارآئی سیستم بالاتر خواهد رفت.

۳ ـ بارگیری اقتصادی از ترانس :

در بررسی‌هایی که در قسمتهای قبل ارائه شد بیشتر جنبهٔ علمی و فنی طراحی و انتخاب ترانس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت ولی از لحاظ اقتصادی نیز لازم می‌باشد تناسبی بین درصد بارگیری ترانس تعریف شود.

در بررسی اقتصادی ابتدا ارزش شاخصهای ریالی "R" را تعیین می‌نماییم. بطور کلی ترانسفورماسیون توزیع را می‌توان به شکل زیر ارزیابی و برآورد هزینه نمود [7].

۱ ـ ۳ ـ هزینهٔ سرمایه‌گذاری ثابت شامل قیمت خرید و نصب ترانس بازای هر کیلوولت آمپر به علاوه هزینه تأمین ظرفیت اضافی سیستم بابت تلفات بی‌باری و بارداری ترانس «هزینهٔ خرید دیماند اضافی» که به صورت رابطهٔ (۸) تعریف می‌گردد:

(۸) : هزینهٔ سرمایه‌گذاری ثابت = $F_T . R_T /KVA + F_S . R_S /KVA (ll_{p.u} + nl_{p.u})$

F_T : ضریب تنوع و استهلاک

F_s : ضریب موقعیت مکانی مصرف

۲ ـ ۳ ـ ارزش ریالی تلفات انرژی به صورت سالیانه و براساس قیمت هر کیلووات ساعت انرژی محاسبه می‌گردد:

(۹) : هزینهٔ انرژی = $(۳۶۵ \times R_E/KWH) [۲۴ (nl_{p.u}) + N^2 (ll_{p.u}) (LF)^2]$

جهت به حداقل رساندن هزینه بهره‌برداری از ترانس در مدت زمان عمر مفید آن که بطور

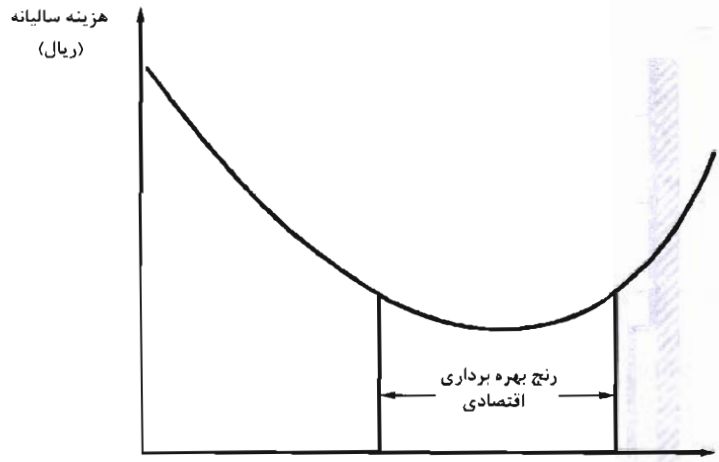
- کل تلفات = $\sqrt{[KW_{nl} + (KW_{FL}) N^{2\,2}] + [KVAR_{NL} + (KVAR_{FL}) N^{2\,2}]}$

متوسط ۲۰ سال در نظر گرفته می‌شود درصد بارگیری توصیه شده "N_c" عبارتنداز: [7,6]

:(۱۰)

$$NC = \frac{\sqrt{F_T\, R_T/KVA + F_s.\, Rs/KVA\,(ll_{p.u} + nl_{p.u}) + ۸۷۶۰\, R_E/KWH\,(nl_{p.u})}}{(۳۶۵ \times R_E/KWH)\,(ll_{p.u}) \times (LF)^2}$$

شکل شماره (۱) اقتصادی‌ترین درصد بارگیری از ترانسهای توزیع را نشان می‌دهد همانطور که ملاحظه می‌شود، در رنج ۸۰٪ بار نامی، کمترین هزینهٔ سالیانه را خواهیم داشت [2].



« شکل ۱ ـ هزینه سالیانه تولید بار به ازای مقدار آن »

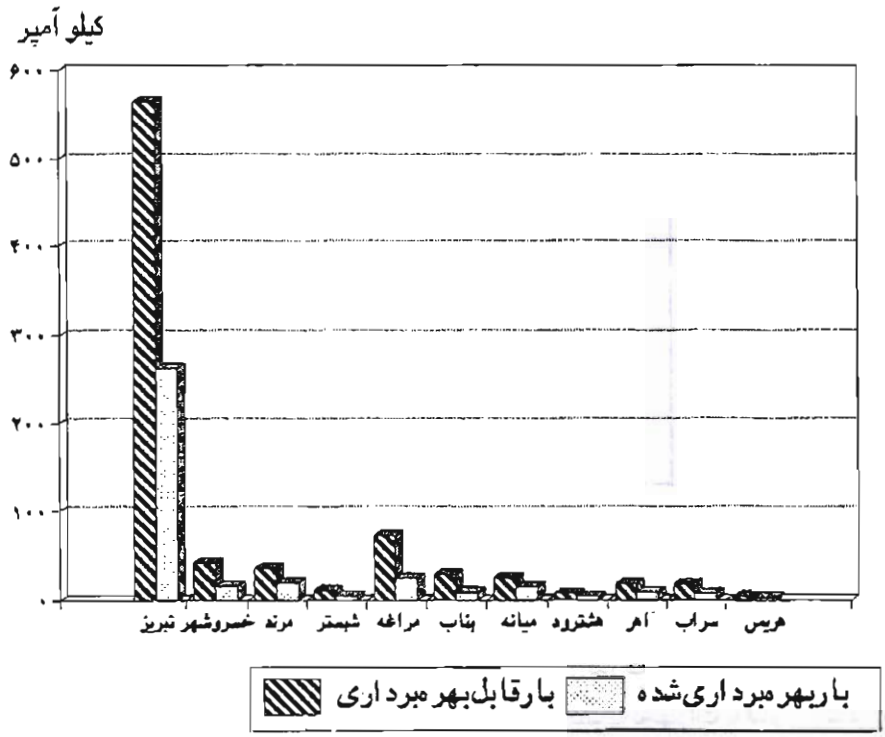
در رنجهای پائین هر چقدر نسبت بار مصرفی ترانس از قدرت نصب شدهٔ آن کمتر شود، هزینه‌های سالیانه استفاده از ترانس به لحاظ سرمایه‌گذاری نصب تجهیزات با قدرت اضافی و همچنین افزایش تلفات نسبت به حالت اولیه بیشتر خواهد شد. و در رنج بالا نیز به علت کاهش عمر مفید ترانسها و افزایش هزینهٔ اتلاف انرژی باز هزینه‌های سالیانه اضافه شده، بهره‌برداری از ترانس‌ها غیراقتصادی خواهد شد.

۴ ـ بارگیری پستهای توزیع زمینی آذربایجان‌شرقی :

بررسی یک نمونه آماری از وضعیت بهره‌برداری از ترانسهای نصب شده در شبکه توزیع ایران و مقایسهٔ آن با روشهای مطرح شده قابل توجه خواهد بود. بدین منظور از نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده از پیک بار مصرفی تمامی پستهای توزیع زمینی ۲۰کیلوولت منطقه آذربایجان‌شرقی که در پائیز ۱۳۷۲ برای این منظور تهیه گردیده، استفاده شده است.

پستهای توزیع زمینی به تعداد ۹۱۶ دستگاه با مجموع ظرفیت ۵۶۷۸۴۰ KVA قدرت نصب شده، مطابق با شکل شمارهٔ (۲) در مناطق مختلف مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند.

به علت اینکه بارگیری در دامنهٔ وسیع تغییر می‌کند آنرا به صورت درصد متوسط برای ترانسهای بکار رفته در شبکه‌های توزیع مورد بررسی قرار داده‌ایم. نتایج به صورت جدول شماره (۲) نشان داده شده است. در محاسبات تلفات بارداری از ضریب بار منطقه آذربایجان به مقدار متوسط LF = ۰/۵۱ استفاده شده است.

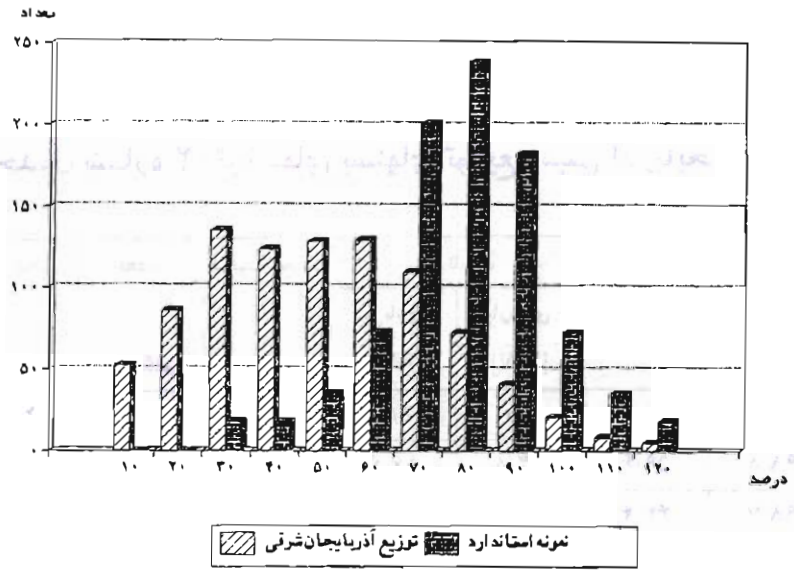


« شکل ۲ ـ مقایسه بار قابل بهره‌برداری با بار بهره‌برداری شده »

جدول شماره ۲ : ترانسهای پستهای توزیع زمینی آذربایجانشرقی

قدرت ترانس	تعداد	ظرفیت منصوبه	کل تلفات		درصد بارگیری	بازده
			بی‌باری	بارداری	N	η
[KVA]	دستگاه	[KVA]	[KW]	[KW]	%	%
۲۵۰	۱۶	۴۰۰۰	۸/۰	۶/۰	۳۴/۹	۹۸/۹
۳۱۵	۲۶	۸۱۹۰	۱۶/۴	۱۲/۸	۵۹/۶	۹۸/۸
۴۰۰	۱۸۳	۷۳۲۰۰	۱۴۶/۴	۵۹/۸۴	۴۳/۴	۹۸/۷
۵۰۰	۱۷۲	۸۶۰۰۰	۱۷۲/۰	۸۶/۱۵	۴۷/۶	۹۸/۷
۶۳۰	۲۵۰	۱۵۷۵۰۰	۳۱۵/۰	۱۳۴/۸	۴۴/۹	۹۸/۷
۸۰۰	۱۸۰	۱۴۴۰۰۰	۲۸۸/۰	۱۱۲/۳	۴۲/۰۹	۹۸/۷
۱۰۰۰	۷۵	۷۵۰۰۰	۱۵۰	۲۹/۸	۳۰/۱۸	۹۸/۴
۱۲۵۰	۷	۸۷۵۰	۱۷/۵	۴/۷	۳۵/۴۳	۹۸/۵
۱۶۰۰	۷	۱۱۲۰۰	۲۲/۴	۲/۱۸	۲۱/۸۶	۹۷/۹
جمع :	۹۱۶	۵۶۷۸۴۰	۱۱۳۵/۷	۴۴۹/۲۹		
میانگین :					۴۰	۹۸/۵۹

بطور متوسط در زمان پیک بار درصد بارگیری از ترانسهای توزیع آذربایجان شرقی مقدار ۴۰٪ قدرت نصب شده می‌باشد. بازده استفاده از این ترانسها مقدار ۹۸/۵۹ درصد را نتیجه می‌دهد که مطلوب نیست. در مقایسهٔ انجام شده بین شبکه توزیع استاندارد در مرجع [9] با شبکه توزیع آذربایجانشرقی در شکل شماره (۳) نمایش فراوانی درصدهای بارگیری مورد استفاده، دیده می‌شود.



« شکل ۳ ـ مقایسه بارگیری از ترانسهای شرکت توزیع آذربایجان‌شرقی با نمونه استاندارد »

نتیجه‌گیری :

بطور اجمال میزان درصد بارگیری از سه دیدگاه مورد بررسی قرار گرفت که از دیدگاه بازده توان رقم ۳۶٪، از دیدگاه بازده انتقال انرژی رقم ۶۷٪ «برای آذربایجان» و به لحاظ اقتصادی رقم ۸۰٪ استنتاج گردید. در اینجا می‌توان نتیجه گرفت که بهترین درصد بارگذاری در زمان نصب و انتخاب صحیح قدرت ترانسفورماتورهای توزیع میزان ۷۵٪ بار نامی آن می‌باشد.

نظر به اینکه قسمت عمده تلفات شبکه‌های توزیع مربوط به تلفات بی‌باری و تلفات بارداری ترانس می‌باشد مطالعات فنی و اقتصادی در رابطه با میزان بارگیری بهینه و کمینه نمودن مقدار این تلفات در تعیین قدرتهای منصوبه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌شود.

عدم توجه در بارگیری مناسب از ترانسهای توزیع باعث افزایش بی‌رویه سرمایه‌گذاری و نهایتاً افزایش تلفات انرژی خواهد بود. با توجه به اینکه در این نوع ترانسها به دلیل فاکتورهایی نظیر: عدم نیاز به مانور، سهولت تعویض ترانس و امکان احداث پستهای جدید (جهت تصحیح افت ولتاژ) و ... پیش‌بینی قدرت ذخیره در طراحی و نصب مردود شناخته می‌شود. بنابراین نصب ترانسهای با قدرت بالاتر از حد نیاز در شبکه‌های توزیع، توجیه‌پذیر نخواهد بود.

مراجع :

[1] کارنامه شرکت برق منطقه‌ای آذربایجان ـ سال ۱۳۷۱.

[2] Electric Power Distribution System Engineering".

by : T.GONEN - McGraw - Hill.1986.

[3] "The J & P Transformer Book". 11 Edition

by : Franklin.

[4] کتابچهٔ مشخصات فنی ترانسفوماتور ۲۰ KV ایران ترانسفو .

[5] استاندارد پیشنهادی ترانسفورماتورهای توزیع ـ مرکز تحقیقات نیرو ـ ۱۳۷۲.

[6] "TRANSFORMERS for the Electric power Industry".

Westing House Electric Co. 1959-CHAP.14.

[7] "Economics of Transformer Design and Application"

Ele.Eng.HAND Book - MITSUBISHI Ele.Co. - CHAP.3

[8] IEC-345- "Loading guide for oil - immersed transformers"

[9] "DISTRIBUTION SYSTEMS"

WESTINGHOUSE ELE. CO. 1965.