

ارائه راهکارهای کاهش مصرف انرژی الکتریکی در کارخانه های صنعتی

نویسنده: احمد رضا عسگری^۱

چکیده

مقاله حاضر به بررسی راهکارهای کاهش مصرف انرژی الکتریکی در کارخانه های صنعتی می پردازد. با توجه به نوع راهکارهای مورد استفاده جهت کاهش مصرف انرژی الکتریکی، این راهکارها متناسب با مدت زمان بازگشت سرمایه و نوع راهکار به سه دسته کوتاه مدت، میان مدت و بلندمدت تقسیم بندی می شود. در مورد موتورهای الکتریکی بیشترین صرفه جویی را می توان با خاموش کردن موتورهای بی بار و در نتیجه حذف تلفات بی باری به دست آورد. یکی از عوامل دیگر افزایش تلفات در موتورهای الکتریکی، کم باری آنها در زمان کار می باشد که موجب کاهش ضریب توان و همچنین افزایش تلفات آهن (تلفات هیستریزیس و تلفات فوکو) می شود. همچنین موتورهای بزرگتر به علت استفاده از حجم بیشتر هسته های مغناطیسی تلفات آهن بزرگتری دارند که این به معنی افزایش تلفات ثابت موتور می باشد. بزرگ بودن سائز موتورهای الکتریکی عمده تاً به دلایل زیر می باشد، محاسبه بار موتور در مرحله طراحی و ضرب آن در یک ضریب جهت اطمینان از کارکرد موتور در شرایط واقعی، ضرب کردن این مقدار در ضریبی دیگر توسط مدیر پروژه و خریداری الکتروموتوری با سائز بزرگتر در صورتی که ظرفیت مورد نظر در بازار موجود نباشد. مجموعه این عوامل موجب می شود تا موتور نصب شده در شرایط عادی زیر بار نامی کار کند.

^۱. کارشناس برق قدرت

۱- مقدمه

با توجه به نوع راهکارهای مورد استفاده جهت کاهش مصرف انرژی الکتریکی، این راهکارها متناسب با مدت زمان بازگشت سرمایه و نوع راهکار به سه دسته کوتاه مدت، میان مدت و بلندمدت مطابق با جدول ۱ طبقه بندی می شوند.

جدول ۱. تقسیم بندی راهکارها با توجه به زمان بازگشت سرمایه

ردیف	نوع راهکار	مدت زمان بازگشت سرمایه (سال)
1	کوتاه مدت	0 - 2
2	میان مدت	2 - 5
3	بلند مدت	5 - 10

برای رسیدن به حد مطلوب استانداردهای جهانی، راهکارهای مدیریتی بهینه سازی مصرف انرژی مطرح می شود. در واقع مسئولیت مدیریت انرژی در امر بهینه سازی مصرف انرژی و مهار نمودن آن با تدابیر لازم به شکل عملی و کاربردی از اهم اموری است که باید مورد توجه قرار گیرد.

در ادامه، راهکارهای بهینه سازی مصرف انرژی الکتریکی در سه بخش راهکارهای کاهش مصرف پیشگیرانه بدون هزینه، راهکارهای کم هزینه (مدیریتی و ترویجی) و راهکارهای پرهزینه جهت بهبود بازده دستگاهها ارائه گردیده و میزان صرفه جویی انرژی و هزینه و مدت زمان بازگشت سرمایه جهت هر کدام از راهکارها آورده شده است. لازم به ذکر است پیش از ارائه راهکارها به دلیل اینکه، موتورهای الکتریکی سهم عمده، در مصرف انرژی الکتریکی دارند، لذا در ادامه گزارش مطابق با میزان بارگذاری تقسیم بندی خواهند شد.

۲- کلاس بندی الکترو موتورهای کارخانه بر اساس میزان بار گذاری

در مورد موتورهای الکتریکی بیشترین صرفه جویی را می توان با خاموش کردن موتورهای بی بار و در نتیجه حذف تلفات بی باری بدست آورد. روش ساده آن در عمل، نظارت دائم یا کنترل اتوماتیک است. اغلب به مصرف برق در بی باری اهمیت چندانی داده نمی شود در حالیکه غالباً موتور در بی باری جریان قابل توجهی دارد. در ادامه با استفاده از میزان بارگذاری الکتروموتورها، آنها را کلاس بندی کرده و وضعیت مصرف انرژی آنها را مورد بررسی قرار خواهیم داد. لذا الکتروموتورهای کارخانه را بر اساس میزان بارگذاری به سه دسته زیرتقسیم می کنیم:

❖ کلاس a: الکتروموتورهای با بارگذاری بین ۷۰٪ تا ۱۰۰٪

❖ کلاس b: الکتروموتورهای با بارگذاری بین ۵۰٪ تا ۷۰٪

❖ کلاس c: الکتروموتورهای با بارگذاری کمتر از ۵۰٪

با توجه به این کلاس بندی، موتورهای کلاس a در وضعیت بهینه می باشند، کلاس b در وضعیت نرمال می باشند. یعنی از لحاظ بار گذاری وضعیت مطلوبی دارند اما امکان بهینه کردن آنها وجود دارد، و می توان برخی راهکارها را روی آنها اعمال کرد. موتور های کلاس c از لحاظ مصرف انرژی وضعیت مناسبی نداشته و می توان مورد بررسی قرار داد.

۳- راهکارهای کاهش مصرف پیشگیرانه بدون هزینه

در این قسمت می توان به بهبود عملکرد الکتروموتورها و سیستم های مرتبط و افزایش بازدهی الکتروموتورها اشاره کرد که در ادامه توضیح داده می شوند.

۳-۱. بهبود عملکرد الکتروموتورها و سیستم های مرتبط

در تمام بخش های صنعتی، برق از مهمترین منابع انرژی به شمار می رود و از آنجا که یکی از مصرف کنندگان عمده انرژی الکتریکی در کارخانجات صنعتی، موتورهای الکتریکی می باشند، لذا بهینه سازی مصرف انرژی در آنها از اهمیت ویژه ای برخوردار است. با توجه به ترازنامه سال ۱۳۸۳، میانگین وزنی سهم الکتروموتورها در کل کشور در حدود ۶۴/۵ درصد می باشد. [۱]

اقدامات مختلفی برای صرفه جویی انرژی الکتریکی در الکتروموتورهای صنعتی، به عمل می آید. برخی از این اقدامات مربوط به مرحله طراحی بوده که در هنگام خرید تجهیزات مورد توجه قرار می گیرند و برخی دیگر باید در هنگام بهره برداری به انجام برسند. اقداماتی نظیر تهویه مناسب، روغن کاری، بارگذاری مناسب و استفاده از درایوهای کنترل سرعت در هنگام بهره برداری باعث بهبود عملکرد تجهیزات الکتریکی موتوری خواهد شد. از آنجایی که یک موتور الکتریکی با دیگر اجزا سیستم قدرت در ارتباط بوده و عملکرد آن وابسته به کیفیت توان شبکه است، لذا در ادامه به بررسی برخی پارامترهای مؤثر در کیفیت توان و کارکرد موتور پرداخته می شود:

❖ هرزگردی موتورها

بیشترین صرفه جویی را می توان با خاموش کردن موتورهای بی بار و در نتیجه حذف تلفات بی باری به دست آورد. روشی ساده آن در عمل نظارت دائم یا کنترل اتوماتیک است. اغلب به مصرف برق در بی باری اهمیت چندانی داده نمی شود در حالیکه غالباً جریان در بی باری حدود جریان در بار کامل است.

❖ موتورهایی که مجدداً پیچیده می شوند

بازده موتورهایی که برای بار دوم پیچیده می شوند بین ۳٪ تا ۷٪ کاهش می یابد که مقدار کاهش بستگی به چگونگی سیم پیچی دارد. یک روش ساده برای ارزیابی کیفیت موتور پیچیده شده مقایسه جریان بی باری موتور

می باشد. این مقدار در موتورهایی که به خوبی پیچیده نمی شوند افزایش می یابد. بررسی روشی که در کارگاه سیم پیچی استفاده می شود نیز می تواند کیفیت کار را مشخص کند. بنابراین در مورد برخی موتورها که راندمان آنها بعد از سیم پیچی مجدد کاهش می یابد. می توان از موتورهای راندمان بالا استفاده کرد.

در مورد سیم پیچی مجدد موتورهای نکات زیر را جهت بهبود کیفیت و راندمان باید مورد توجه قرار داد: وقتی موتوری را برای پیچیدن مجدد باز می کنند عایق بین ورقه ها خراب می شود و باعث افزایش تلفات جریان گردابی می گردد مگر این که باز کردن (سوزاندن) عایق در کوره ای با دمای قابل تنظیم انجام گیرد و ورقه های عایق غیر آلی جایگزین گردد.

گداختن و سوزاندن سیم پیچ کهنه (خراب شده) در دمای کنترل نشده یا استفاده از یک مشعل دستی برای نرم کردن و خرد کردن لاک بین سیم ها به منظور باز کردن آسان تر سیم پیچ به این معنی است که کار در این کارگاه به خوبی انجام نمی شود و باید به کارگاه دیگری برای پیچیدن موتور مراجعه نمود. اگر در نتیجه باز کردن و سوزاندن نامناسب تلفات هسته افزایش یابد موتور در دمای بیشتری کار می کند و زودتر از موعد خراب می شود.

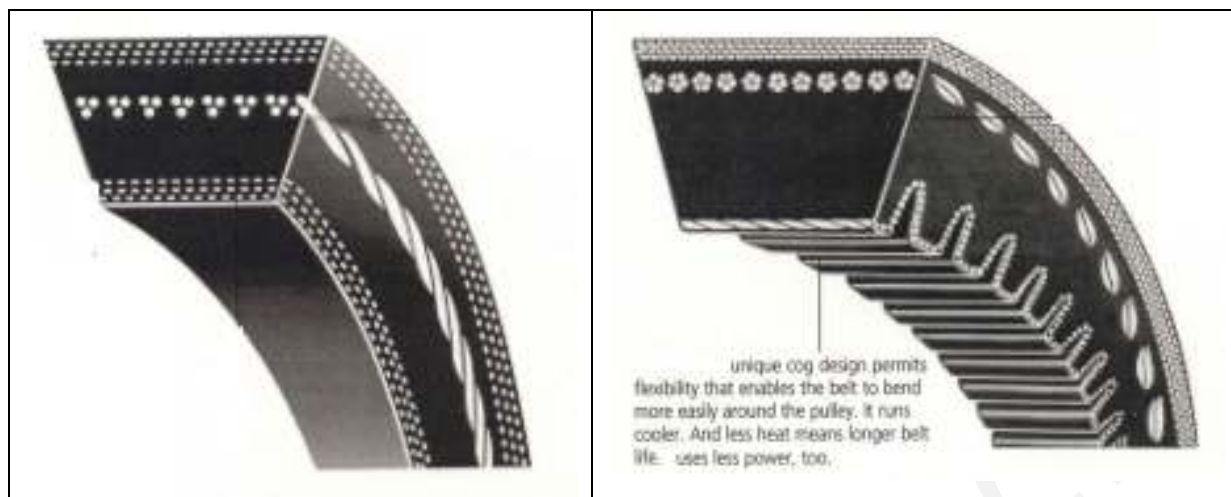
اگر تعداد دورهای سیم پیچ در استاتور کاهش یابد تلفات هسته استاتور افزایش می یابد این تلفات در نتیجه جریان ناشی (هارمونیک) القا شده توسط جریان بار به وجود می آید و اندازه آن برابر با توان دوم جریان بار است. در پیچیدن موتور اگر از سیم های با قطر کوچکتر استفاده شود مقاومت و در نتیجه تلفات RI^2 افزایش می یابد.

❖ استفاده از تسمه های **cogged - belt** و **synchronus-belt** به جای تسمه های **flat-belt** و **v-belt** در الکتروموتورها

تسمه های **v-belt** در زمان نصب بازدهی برابر با ۹۵٪ تا ۹۸٪ دارند. این تسمه ها به دلیل لغزش روی پولی حدود ۵٪ کاهش راندمان خواهند داشت. و راندمان این تسمه تا حدود ۹۳٪ خواهد رسید.

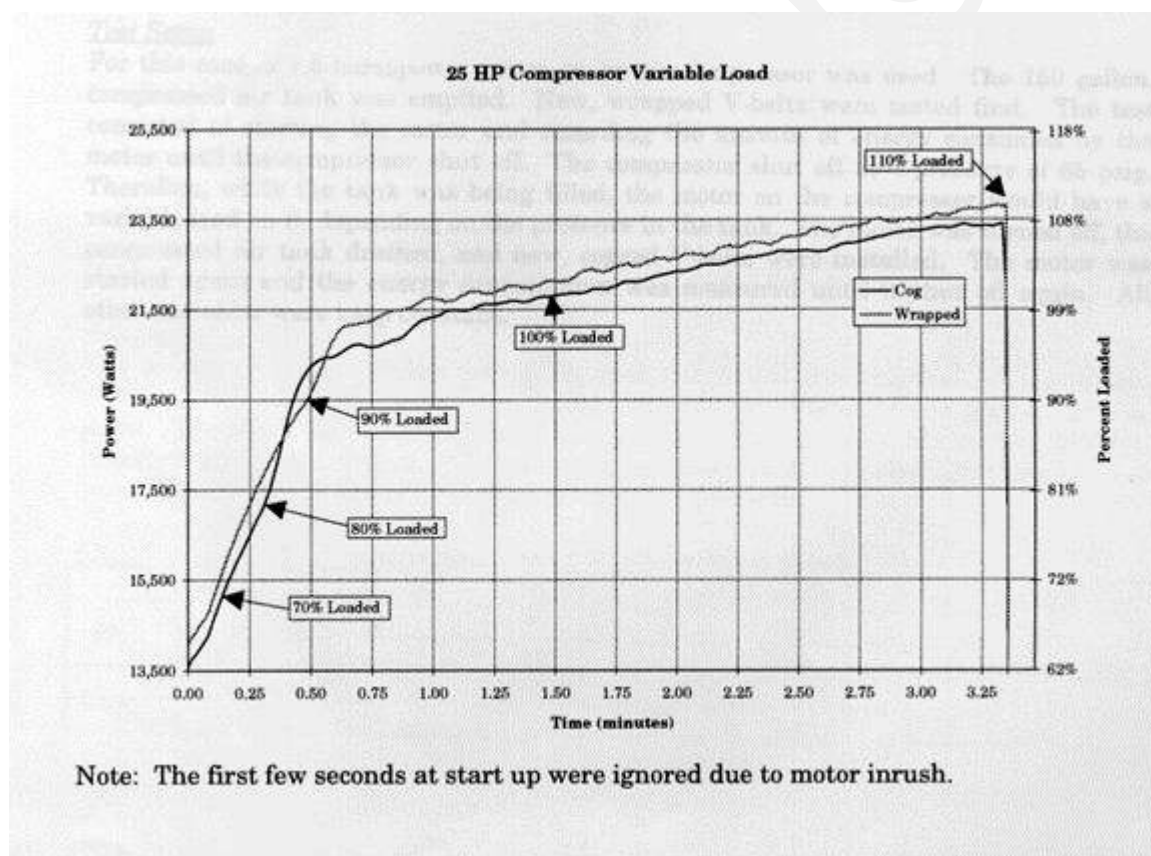
تسمه های **cogged** دارای دندانه هایی می باشند که باعث افزایش راندمان تا حدود ۲ درصد نسبت به تسمه های **v-belt** و **flat-belt** می شوند. این دندانه ها باعث کاهش مقاومت خم شدگی تسمه می شوند و در حرارت کمتری کار می کنند و طول عمر بیشتری دارند. همچنین تسمه های سنکرون علاوه بر دارا بودن دندانه های روی تسمه، یک سری شیارهایی روی خود پولی وجود دارد که باعث افزایش راندمان می شود و از لیز خوردگی تسمه روی موتور جلوگیری می کند. ویژگی های این تسمه ها کم بودن تعمیر و نگهداری آنها می باشد. ولی تنها عیب آنها این است که تمام لغزش ها را به بار انتقال می دهند.

بنابراین تسمه های سنکرون پر بازده ترین نوع تسمه ها می باشند. اما برای بارهایی که دارای لغزش می باشند یعنی شوک در بار ایجاد می شود بهتر است از تسمه های **cogged** استفاده شود. شکل ۱ نمونه ای از این تسمه ها را نشان می دهد.



Standard and cogged V-belts. Source: Dayco CPT, www.cptbelts.com

شکل ۱. نمونه ای از تسمه های flat-belt و cogged [۲]



شکل ۲. منحنی مصرف توان یک موتور با دو نوع تسمه flat-belt و cogged در بارهای مختلف [۲]

جهت بررسی تأثیر کارکرد تسمه های راندمان بالا در کاهش مصرف انرژی الکتریکی به مثال زیر توجه کنید. در یک موتور ۱۰۰ hp که با تسمه های v-belt و راندمان ۹۳ درصد در ۷۵ درصد بار نامی کار می کند و میزان

مصرف انرژی الکتریکی سالیانه آن برابر با ۵۲۷۰۰۰ کیلو وات ساعت می باشد در صورت استفاده از تسمه های سنکرون (با راندمان ۹۸ درصد) میزان صرفه جویی انرژی الکتریکی سالیانه به شرح زیر خواهد بود.

$$\text{میزان صرفه جویی انرژی الکتریکی} = ۲۶۸۸۸ \text{ (kWh/year)} = ۵۲۷۰۰۰ \text{ (kWh/year)} \times \left(1 - \frac{E_1}{E_2}\right) = ۵۲۷۰۰۰ \text{ (kWh/year)} \times \left(1 - \frac{۹۳}{۹۸}\right)$$

صرفه جویی انرژی الکتریکی

با فرض هزینه هر کیلووات ساعت برابر ۴۳۰ ریال مقدار صرفه جویی هزینه برابر است با:

$$\text{صرفه جویی هزینه} = ۲۶۸۸۸ \times ۴۳۰ \text{ (Rials/kwh)} = ۱۱,۵۶۱,۸۴۰ \text{ (Rials/year)}$$

به عنوان نمونه میکسرهای موجود در سلولهای فلوتاسیون از طریق تمسه با موتور خود در ارتباط می باشند. لذا توصیه می شود، این تمسه ها با تمسه های راندمان بالا تعویض شوند. بنابراین واحد مدیریت انرژی کارخانه باید طی بازدید و بازبینی از وضعیت تمسه های کلیه الکتروموتورهای موجود کارخانه (به ویژه موتورهای توان بالا) و با توجه به روش فوق و در نظر گرفتن هزینه ها پیشنهادات و توجیه پذیری جهت تعویض تمسه ها به مدیریت کارخانه ارائه دهد.

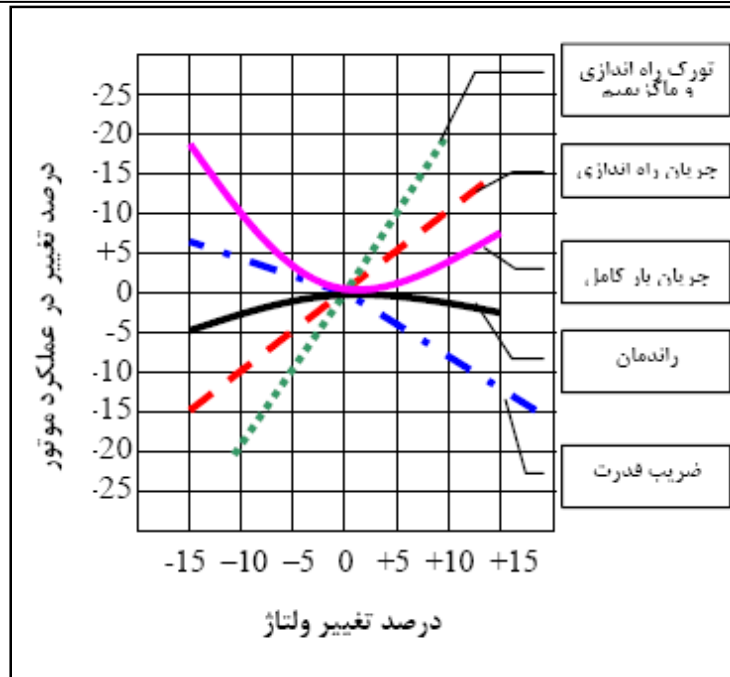
❖ ولتاژ مناسب شبکه

ولتاژ اعمال شده به ترمینال باید در حد امکان نزدیک به ولتاژ کار موتور باشد. تغییرات ولتاژ در حدود ۵٪+ الی ۱۰٪- مجاز می باشد (شکل ۳). تغییر ولتاژ اعمال شده در الکتروموتورها اثرات زیر را به همراه خواهد داشت [۲]:

افت ضریب قدرت

کاهش عمر مفید موتور

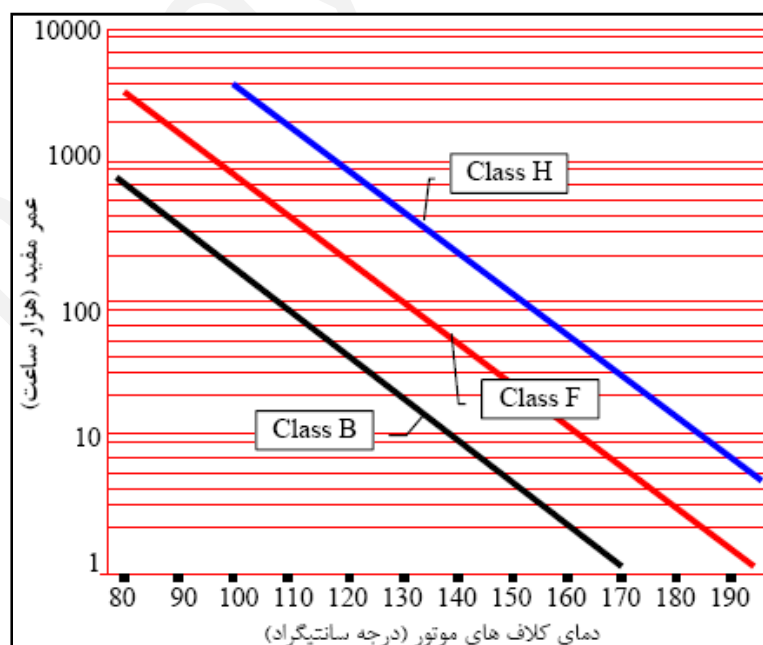
کاهش راندمان موتور



شکل ۳. اثرات تغییرات ولتاژ بر عملکرد الکتروموتورها

همانگونه که در شکل فوق مشخص است، با تغییر ۵٪ در ولتاژ القایی، راندمان موتور بین ۲ تا ۴ درصد کاهش خواهد داشت.

همچنین تحقیقات نشان می‌دهد، با تغییر ۵٪ در ولتاژ، دمای موتور حدود ۱۵ درجه افزایش خواهد یافت که با توجه به شکل ۴ این افزایش دما موجب افزایش دمای عایق و در نتیجه کاهش عمر الکتروموتور خواهد شد.



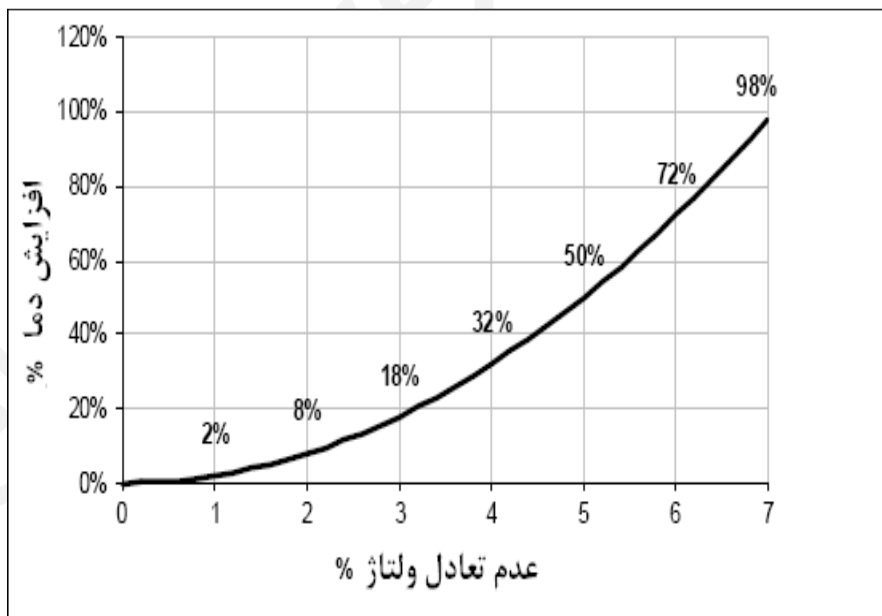
شکل ۴. ارتباط تغییرات مربوط به افزایش دما با عمر عایق

❖ تقارن الکتریکی سه فاز

در یک سیستم سه فاز متقارن، ولتاژ هر یک از فازها از لحاظ اندازه با یکدیگر برابر بوده و ۱۲۰ درجه اختلاف فاز دارند. فاکتورهای بسیاری در تعادل الکتریکی فازها تأثیرگذار می باشد، از جمله بارهای تکفاز، متفاوت بودن سایز کابل ها در هر یک از فازها، یا بروز خطای تک فاز و عدم تقارن فازها باعث افزایش تلفات سیستم توزیع و کاهش راندمان موتورها می شود.

از احداث شبکه ها به صورت تک فاز اجتناب شود. اگر واگذاری انشعاب سه فاز به جای تک فاز از نظر مقررات جاری مقدور نباشد تفهیم این مطلب به کادر طراحی و اجرایی کارخانه ها حائز اهمیت است که خطوط سرویس را به صورت سه فاز دایر نمایند و مشترکین مجاور را از جعبه انشعاب سه فاز تامین برق کنند و از احداث خط سرویس های تک فاز جداگانه برای هر مشترک اجتناب نمایند.

با نصب متعادل کننده های ولتاژ در محلی از شبکه، نامتعادلی ولتاژها کاهش می یابد. نامتعادلی ولتاژ روی پارامترهای کارکرد موتور تأثیر بسزایی دارد و برای به حداقل رساندن آن، می توان از آرایش متناسب و معقول پخش بار سود جست و یا بهترین ایده استفاده از SVC ها جهت جبران هر نوع نامتعادلی در سیستم است. لازم به ذکر است جهت بررسی بیشتر عدم تعادل ولتاژ نیاز به تحلیل نقاط مختلف شبکه و شبیه سازی آن می باشد. [۴]

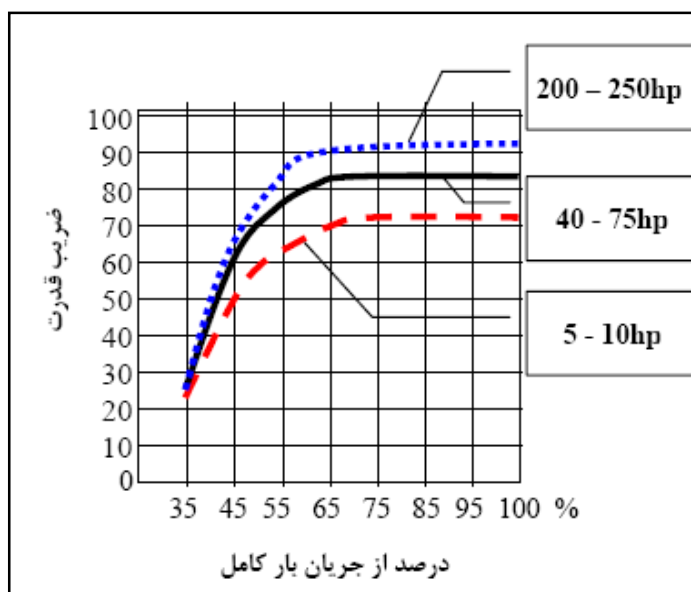


شکل ۵. افزایش دما با توجه به ولتاژهای نامتعادل

به طور مثال موتوری را با دمای ۸۰ درجه سانتیگراد در نظر بگیرید، در صورتیکه ۲ درصد عدم تعادل ولتاژ داشته باشد، دمای آن ۶/۴ درجه افزایش خواهد یافت.

❖ ضریب قدرت

کاهش ضریب قدرت موجب افزایش جریان کابل‌ها، افزایش جریان ترانسفورماتورها، افت ولتاژ و در نتیجه کاهش ظرفیت تغذیه می‌شود. [۶] ضریب قدرت پایین ناشی از بار کم در شفت موتور است. در شکل ۶ منحنی‌های ضریب قدرت برای بارهای مختلف در رنج‌های توانی متفاوت موتورها آمده است. به وضوح مشاهده می‌شود که با کاهش بار موتور، ضریب قدرت کاهش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت. [۳]



شکل ۶. تغییرات ضریب قدرت متناسب با بار موتور

❖ افزایش بازدهی الکتروموتورها با اجرای برنامه تعمیرات و نگهداری

تلفات اهمی موتور با توجه به درصد بارگذاری، دمای محیط و حرارت ایجاد شده در سیم‌پیچ الکتروموتور در اثر عبور جریان متغیر می‌باشد. تلفات مکانیکی نیز عمدتاً در قسمت‌های متحرک و گردان، ناشی از اصطکاک و مقاومت هوا به وجود می‌آیند. بنابراین با اجرای برنامه‌های منظم تعمیرات و نگهداری به راحتی می‌توان میزان این تلفات را به حداقل رساند. در همین راستا نکات زیر قابل توجه می‌باشند:

- تلفات مکانیکی موتورها بستگی به شرایط نگهداری آن‌ها دارد.
 - با نگهداری و سرویس به موقع موتورها و اجرای برنامه‌های PM میزان تلفات به حداقل می‌رسد.
 - تلفات مکانیکی در موتورها موجب افزایش درجه حرارت سیم‌پیچ‌ها و کوتاهی عمر آن‌ها می‌شود.
 - مناسب بودن سیستم خنک‌کننده موتورها تأثیر زیادی در کاهش درجه حرارت سیم‌پیچ موتورها دارد.
- در بسیاری از موارد به علت عدم نگهداری صحیح موتورها و افزایش درجه حرارت بدنه آنها به جای رفع اشکال، به تعویض و جایگزینی آن با موتور بزرگ‌تر پرداخته می‌شود. این امر باعث افزایش هزینه‌های مربوطه در خرید موتور جدید و همچنین اتلاف انرژی خواهد شد. مواردی که در نگهداری موتورهای الکتریکی دارای اهمیت بوده و در بازدهی‌های برنامه‌ریزی شده بررسی می‌شوند، عبارتند از:

- تمیز بودن بدنه موتور و دریچه های سیستم تهویه
- روغن کاری قسمت های متحرک موتور
- محکم بودن اتصالات مکانیکی^۲
- بررسی تعادل ولتاژهای سه فاز
- تهیه چک لیست برای موتورهای بازدید شده

خلاصه ای از عوامل مؤثر در بهره برداری از موتور که منجر به افزایش بازدهی آن ها می شود، در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. عوامل مؤثر در بازدهی موتورهای الکتریکی

توضیحات	شرایط کارکرد موتور	
انتخاب بار موتور در حدود ۸۰ تا ۱۰۰ درصد بار نامی جهت بازدهی حداکثر موتور	بار کامل	وابسته به شرایط بارگذاری موتور
برای جلوگیری از هرگونه تغییر سرعت موتور	بار ثابت	
در صورت لزوم، تغییر سرعت توسط کنترل کننده های دور موتور (درايوها)	سرعت	
برای جلوگیری از کاهش گشتاور موتور	ولتاژ ثابت	وابسته به شرایط نگهداری موتور
برای اطمینان یافتن از عدم افزایش دمای موتور از حد مجاز و برخورداری از عمر مفید موردنظر	تهویه	
برای جلوگیری از اعمال بار اضافی (مجازی) بر محور موتور ناشی از افزایش اصطکاک	روغن کاری	

در ادامه در جدول ۳ یک لیست پیشنهادی جهت زمان بندی بازرسی موتورها ارائه شده است، که می تواند در کارخانه مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۳. لیست پیشنهادی برنامه زمان بندی بازرسی موتورها

شرح کار	پیشنهادهای	بازدید
هم راستایی اتصالات	بازدید محل اتصالات از نظر تجمع ذرات آهن و شنیده شدن صدای غیرعادی	هفتگی
وضعیت موتور	بررسی میزان دما و لرزش موتور	هر سه ماه
تمیزکاری	پاک کردن بدنه موتورها به منظور بهبود فرآیند خنک سازی	هر سه ماه
روغن کاری	بررسی بلبرینگ ها از لحاظ روغن کاری طبق دستور سازنده	سالانه
بررسی محل نصب موتورها	محکم کردن موتورها در محل آنها	سالانه
بررسی ترمینال ورودی موتورها	محکم کردن اتصالات الکتریکی	سالانه
بررسی تعادل الکتریکی سه فاز	برطرف کردن مشکل عدم تعادل فازها در صورتیکه از ۲٪ بیشتر باشد	سالانه
بررسی ولتاژ ورودی موتورها	بهبود ولتاژ ورودی در صورتیکه تفاوت زیادی با مقادیر طراحی داشته باشد	سالانه

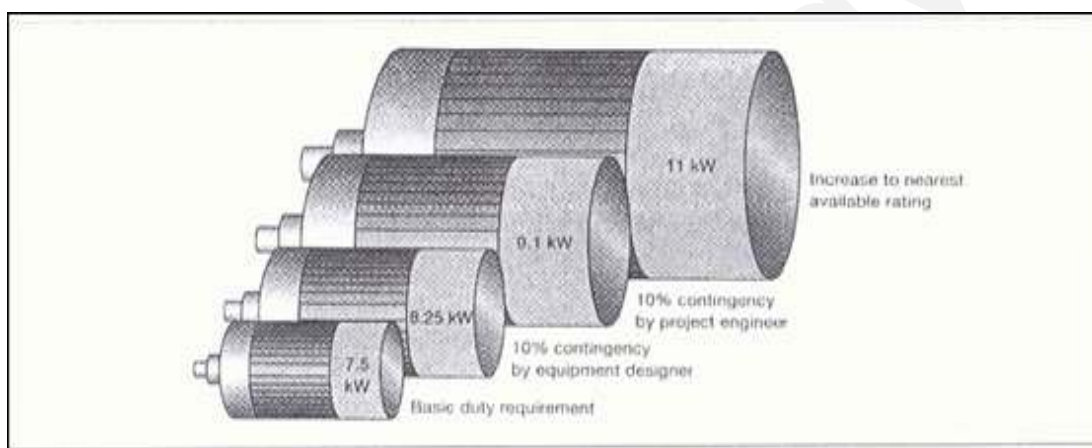
همانطور که مشاهده می شود مجموعه اقدامات ساده فوق، خصوصاً اقداماتی که به عوامل وابسته به شرایط

² Couplings

نگهداری موتور می شود، می تواند منجر به صرفه جویی اقتصادی قابل توجهی شود.

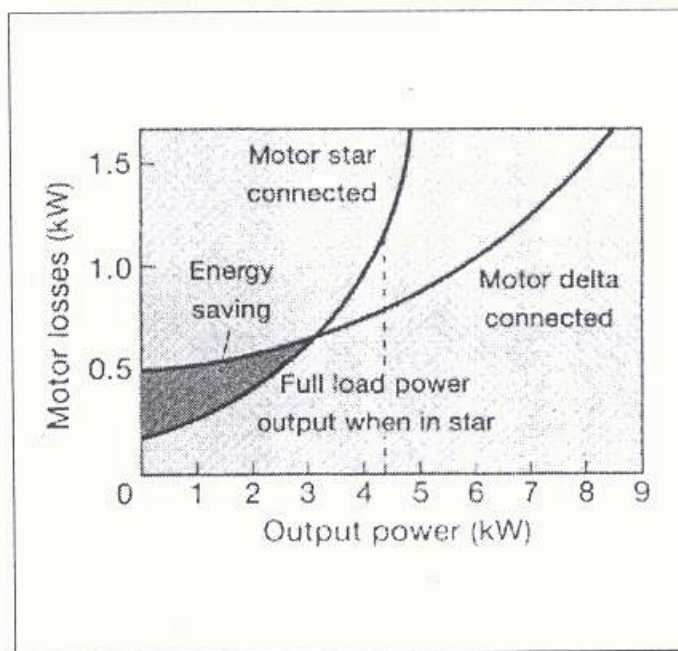
۳-۲. استفاده از روش هایی به منظور کاهش تلفات داخلی الکتروموتور

یکی از عوامل افزایش تلفات در موتورهای الکتریکی، کم باری آنها در زمان کار می باشد که موجب کاهش ضریب توان و همچنین افزایش تلفات آهن می شود. همچنین موتورهای بزرگتر به علت استفاده از حجم بیشتر هسته های مغناطیسی تلفات آهن بزرگتری دارند که این به معنی افزایش تلفات ثابت موتور می باشد. بزرگ بودن سایز موتورهای الکتریکی عمدتاً به دلایل زیر می باشد، محاسبه بار موتور در مرحله طراحی و ضرب آن در یک ضریب جهت اطمینان از کارکرد موتور در شرایط واقعی، ضرب کردن این مقدار در ضریبی دیگر توسط مدیر پروژه و خریداری الکتروموتوری با سایز بزرگتر در صورتی که ظرفیت مورد نظر در بازار موجود نباشد. مجموعه این عوامل موجب می شود تا موتور نصب شده در شرایط عادی زیر بار نامی کار کند. (شکل ۷)



شکل ۷. دلایل انتخاب نامناسب سایز موتورها

جهت بهینه سازی در چنین مواردی سه راه وجود دارد. یکی تعویض موتور که به تنهایی توجیه پذیر نبوده و بیشتر در مواقعی صورت می پذیرد که موتور موجود سوخته و به جای تعمیر، تعویض می شود که علاوه بر تهیه موتور می توان از موتورهای جدید راندمان بالاتر نیز استفاده نموده و در این حالت صرفه جویی خوبی حاصل می گردد. راه دیگر استفاده از راه اندازی های نرم با متدهای بهینه سازی مصرف انرژی می باشد که معمولاً هزینه آن از تهیه الکتروموتور جدید نیز بیشتر بوده ولی فواید دیگر نظیر کنترل و حفاظت اضافی بر روی موتور را دارد. راه حل سوم استفاده از مبدل های ستاره مثلث و یا قرار دادن اتصال ستاره برای الکتروموتورهایی که به طور دائم در زیر ۴۰ درصد بار نامی کار می کنند. شکل ۸ تلفات موتور را در دو حالت اتصال ستاره و مثلث برای یک الکتروموتور ۷/۵ کیلووات نشان می دهد.



شکل ۸. صرفه جویی انرژی به وسیله تغییر اتصالات در یک موتور ۷/۵ کیلووات

همانگونه که شکل ۸ نشان می دهد، اگر موتور زیر ۴۰ درصد بار نامی کار کند، در صورت استفاده از اتصال ستاره به جای مثلث، تلفات کل موتور کاهش می یابد. ولی اگر بار موتور بالا برود، استفاده از اتصال ستاره نتیجه معکوس خواهد داد و باعث افزایش تلفات کل موتور و در بعضی مواقع حتی آسیب رساندن به موتور خواهد شد. بنابراین راهکار مذکور برای موتورهایی که به طور دائم در زیر ۴۰ درصد بار نامی کار می کنند، توجیه پذیر است. باید توجه داشت برای این کار فقط کافی است اتصالات موتورهایی که دائماً زیر ۴۰ درصد کار می کنند را از حالت مثلث به ستاره تبدیل کرد که این کار بدون هزینه می باشد. بررسی های انجام گرفته نشان می دهد، هنگامی که بار موتور به حدود ۴۰ درصد بار نامی می رسد، در مصرف انرژی حدود ۵ تا ۱۰ درصد صرفه جویی رخ می دهد. لازم به ذکر است که راهکار فوق برای موتورهای با توان پایین که از راه انداز ستاره مثلث استفاده می کنند، قابل اجراست [۳]

۴- تعیین میزان انرژی الکتریکی، تعیین تعرفه و انتخاب گزینه مناسب (راهکارهای کم هزینه، مدیریتی و ترویجی)

در این بخش به ارائه راهکارهای کم هزینه (مدیریتی و ترویجی) که عمدتاً مربوط به آیتم های آورده شده در قبوض برق می باشد، پرداخته می شود.

۴-۱. برنامه ریزی مدیریت بار با هدف کاهش هزینه های انرژی و دستیابی به مقادیر بهینه مصرف انرژی: مدیریت بار به معنی تغییر و بهینه سازی مصرف انرژی با حفظ سطح تولید می باشد. بنابراین کنترل رشد بار، تغییر شکل منحنی بار، صرفه جویی در مصرف برق و استفاده از منابع اختصاصی (مثل استفاده از دیزل) همگی در این مقوله می گنجد. راه های مختلفی جهت اصلاح منحنی بار وجود دارند. که از آن جمله می توان به پیک سایی،

پرو کردن دره ها و انتقال بار اشاره نمود. با توجه به اهمیت پیکسایبی در مصرف انرژی الکتریکی، وزارت نیرو سیاستهای تشویقی خاصی برای کارخانههایی که در ساعات پیک بار، مصرف انرژی الکتریکی خود را کاهش می دهند اعمال می نماید. لذا این راهکار به عنوان روشی که در کاهش قیمت محصول تولیدی مؤثر است می تواند مدنظر قرار گیرد.

منحنی بار طی مدت شبانه روز دارای وضعیت حداکثر و حداقل مصرف می باشد. مدت زمان حداکثر بار، ساعات اوج یا پیک مصرف و مدت زمان حداقل بار، ساعات کم باری نامیده می شود. ساعات پیک مصرف پس از غروب آفتاب و تاریک شدن هوا تا نزدیک نیمه شب اتفاق می افتد. در تعرفه های برق مدت تعیین شده برای ساعات پیک ۴ ساعت و زمان آن در شش ماهه اول سال بین ساعات ۱۹ الی ۲۳ و در شش ماهه دوم سال بین ساعات ۱۸ الی ۲۲ می باشد.

در کارخانه ها برخی قسمت های خط تولید هستند که امکان مدیریت بار و مدیریت خاموشی روی آنها وجود دارد و در ساعات پیک می توان آنها را از مدار خارج کرد بدون اینکه تاثیری در خط تولید داشته باشند. به عنوان نمونه در مجتمع های مس، واحد سنگ شکن و نوار نقاله های مربوطه یکی از قسمت هایی است که در ساعات پیک می توانند از مدار خارج شوند.

در واحد سنگ شکن با برنامه ریزی روی ساعات کار این قسمت، می توان زمان های کاری که در ساعات اوج بار می باشد، را به ساعات کم باری انتقال داد البته بحث کاهش مصرف در ساعات پیک باید طوری باشد که شرایط ایمنی لحاظ شده و بر شرایط تولید و بهره برداری تأثیر نامطلوب نداشته باشد. با توجه به اینکه در هر شبانه روز این واحد به طور ناپیوسته کار می کند، اگر انتقال مجموع ساعات کاری یاد شده از زمان اوج بار به کم باری انجام گیرد، هزینه ی قابل توجهی صرفه جویی می شود.

به همین ترتیب بخش هایی از کارخانه که به طور غیر مستقیم در پروسه خط تولید دخالت دارند را می توان در زمان پیک از مدار خارج کرد. این بخش ها شامل قسمت های کارگاهی، پمپ های آب غیر ضروری و سنگ شکن ثانویه و نوار نقاله های مربوط به آن می باشد. علاوه بر این در زمان کاهش تولید می توان برخی قسمت های مصرف را مدیریت کرد که این مدیریت کردن نیاز به بررسی دقیق خط تولید ونحوه کار دستگاه ها دارد. لازم به ذکر است مصرف برق امور لیچینگ نیز از زمان اوج بار به زمان کم باری قابل تغییر می باشد.

۵- بررسی شبکه روشنایی کارخانه و راهکارهای کاهش مصرف انرژی الکتریکی در بخش روشنایی

تجربه نشان داده است که بهره و کیفیت انجام بسیاری از کارها به خصوص کارهای ظریف، با افزایش شدت روشنایی روی سطح کار بالا می رود. از طرفی شدت روشنایی بالاتر مستلزم هزینه های جاری بیشتر است. لذا در طراحی یک سیستم روشنایی باید به راحتی، بهره کاری و هزینه های جاری به صورت همزمان توجه گردد.

۶- ارائه راهکارهای کاهش مصرف در بخش روشنایی ساختمان های اداری

۶-۱. استفاده از لامپ های فلورسنت قطر کم (T8)

یکی از راهکارهای کاهش مصرف انرژی در ساختمان استفاده از لامپ های فلورسنت قطر کم (T8) و ترجیحاً از نوع ترای بند بجای لامپ های فلورسنت معمولی می باشد. مزایای استفاده از لامپ فلورسنت قطر کم (T8) با پوشش ترای بند نسبت به لامپ های فلورسنت معمولی عبارتند از:

- افزایش طول عمر لامپ
- افزایش بهره نوری و شار نوری
- افت نور کمتر
- ثابت بودن شار نوری با گذشت زمان
- توان مصرفی ثابت و همچنین کاهش مصرف به میزان حداقل ۱۰٪
- شاخص نمود رنگ مناسب

در جدول ۴ به مقایسه مشخصات لامپ های فلورسنت معمولی (T10) و لامپ های فلورسنت قطر کم (T8) با پوشش ترای بند پرداخته می شود. [۷]

جدول ۴. مقایسه مشخصات لامپ های فلورسنت

مشخصات	لامپ فلورسنت معمولی (T10)	لامپ فلورسنت قطر کم (T8) با پوشش ترای بند
توان مصرفی (وات)	40	36
شار نوری (لومن)	2500	3250
طول عمر متوسط لامپ (ساعت)	13000	15000
قطر لامپ (میلیمتر)	32	26
پایه لامپ	G13	G13
افت شار نوری بعد از ۴۰۰۰ ساعت	20%	7%
طول لامپ (میلیمتر)	1200	1200
شاخص نمود رنگ (CRI)	70<Ra<80	80<Ra<90
بازده (لومن بر وات)	62.5	90

۶-۲. استفاده از بالاست‌های الکترونیکی

تمامی لامپ‌های فلورسنت و تخلیه گازی به منظور راه‌اندازی و کار نیاز به تجهیزاتی به نام بالاست دارند. بالاست، ولتاژ بالایی را برای شروع تخلیه به لامپ اعمال می‌کند و پس از آن به سرعت جریان لامپ را محدود می‌کند. پیشرفت‌هایی که در فناوری ساخت بالاست برای سیستم روشنایی صورت گرفته منجر به بهبود عملکرد، افزایش بازده و کاهش مصرف انرژی در این سیستم شده است. نمونه ای از این فناوری نوین تولید بالاست‌های الکترونیکی است که استفاده از آنها یکی از راهکارهای کاهش مصرف انرژی می‌باشد.

- بالاست‌های الکترونیکی دارای خصوصیات زیر هستند:
- افزایش بازده نور
- تلفات کمتر، بازده بیشتر
- کاهش وزن مدار
- افزایش ضریب توان مدار و کاهش توان راکتیو، عدم نیاز به خازن‌گذاری جهت ایجاد ضریب توان
- راه‌اندازی کنترل شده و شرایط کاری مطلوب تر (افزایش عمر لامپ)
- قابلیت روشن نمودن یک تا چهار لامپ به طور موازی
- عدم مصرف انرژی در حالت لامپ سوخته
- محافظت از لامپ در مقابل نوسانات برق
- دارای طول عمر بالاتر نسبت به بالاست‌های القایی

به عنوان مثال تلفات بالاست به ازای یک لامپ ۳۶ وات به ۲ وات کاهش می‌یابد. [۷]

در بالاست‌های مغناطیسی به علت وارد کردن شوک در زمان قطع و وصل لامپ‌های فلورسنت، طول عمر لامپ‌ها از حد استاندارد کمتر می‌شود. این درحالیست که استفاده از بالاست‌های الکترونیکی از بروز چنین شوک‌هایی در زمان سوئیچینگ و قطع برق جلوگیری می‌نماید. همچنین با توجه به اینکه بالاست‌های الکترونیکی دارای طول عمر بالاتری نسبت به بالاست‌های مغناطیسی هستند و نیز قابل کنترل می‌باشند (جهت کنترل میزان روشنایی و کاهش مصرف)، لذا بازگشت سرمایه محاسبه شده در جدول فوق توجیه پیدا می‌کند.

۶-۳. ارائه سیستم تعمیر و نگهداری مدون

با گذشت زمان و سپری شدن طول عمر، از میزان نوردهی لامپ‌ها کاسته می‌شود. لذا پس از سپری شدن مدت زیادی از عمر لامپ و قبل از سوختن کامل آن باید نسبت به تعویض لامپ اقدام نمود. دو روش اصلی برای انجام این کار وجود دارد: ۱- تعویض لامپ به صورت نقطه‌ای ۲- تعویض لامپ به صورت گروهی.

در روش اول وقتی که لامپی بسوزد یا نور آن تا حدی کاهش یابد که موجب بروز مشکل گردد، نسبت به

تعویض آن اقدام می‌شود. این روش وقتی که تعداد لامپ‌ها کم است و تعویض آن بوسیله خود کارکنان انجام می‌شود، مناسب می‌باشد. به هر حال این روش در طول زمان بسیار پر هزینه خواهد بود، زیرا با توجه به نوع قاب‌های استفاده شده در ساختمان، نگهدارنده و روکش‌های چراغها در هنگام تعویض لامپ باید از چراغها جدا شوند و امکان شکستن و خرابی در آنها وجود دارد.

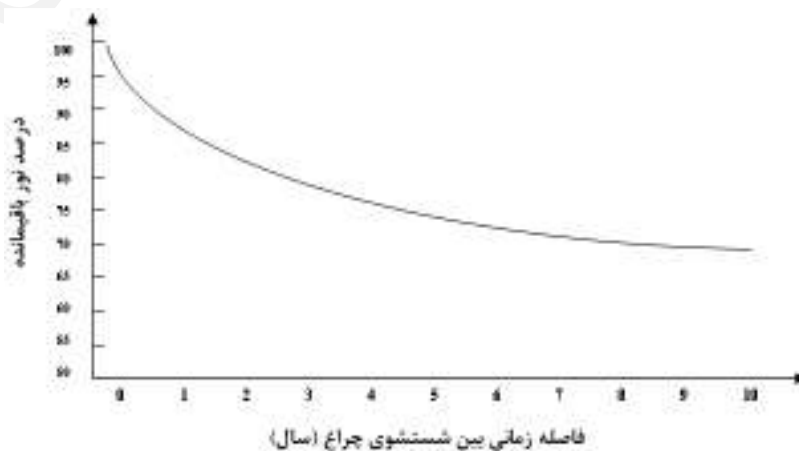
روش دوم جایگزینی همه لامپ‌ها در یک سیستم روشنایی است، صرفه‌نظر از اینکه چه تعداد از آنها معیوب بوده و یا سوخته‌اند. از این روش در سیستم‌هایی استفاده می‌شود که تعداد لامپ‌ها زیاد است و تعویض لامپ‌ها توسط تعمیرکاران مجموعه و یا پیمانکاران انجام می‌شود. عموماً جایگزینی همه لامپ‌ها در زمانی صورت می‌پذیرد که لامپ‌ها حداقل ۷۰٪ طول عمر مفیدشان را طی کرده باشند. به عنوان مثال اگر طول عمر لامپی ۲۰۰۰۰ ساعت و لامپ سالانه ۲۵۰۰ ساعت روشن باشد، زمان تعویض آن در حدود ۵/۶ سال خواهد بود.

اجرای این روش (تعویض گروهی) عموماً به افزایش بهره‌وری سیستم روشنایی کمک می‌کند. زیرا اگر سیستم روشنایی بخوبی مورد تعمیر و نگهداری قرار گیرد، ممکن است که تعداد لامپ کمتر با وات کمتر نیز جوابگوی روشنایی موردنیاز باشند.

شایان ذکر است بعضی اوقات، بخصوص در فضاهایی که روشنایی کامل موردنیاز است، لازم خواهد بود که بعضی از لامپ‌های سوخته، خارج از برنامه تعویض گروهی، تعویض شوند تا سطح روشنایی موردنیاز کاربر فراهم شود.

گرد و غبار و کثیفی که روی لامپ‌ها، قاب، شیشه و سطوح داخلی چراغها بوجود می‌آید، مقدار زیادی از نور خروجی لامپ‌ها را کاهش می‌دهد. علاوه بر آن تجمع گرد و غبار روی سطح چراغ موجب گرم شدن لامپ و بالاست می‌شود که این امر طول عمر آنها را کاهش می‌دهد. لذا نظافت منظم موجب افزایش کارایی لامپ خواهد شد.

از دلایل افت شدت نور در طول زمان به کاهش نور لامپ به مرور زمان (طول عمر لامپ) و همچنین کثیف شدن سطوح انعکاس میتوان اشاره نمود. در شکل ذیل تأثیر تمیز کردن چراغها (تعمیر و نگهداری) بر روی افت شدت نور لامپها و چراغها به وضوح قابل مشاهده است.



شکل ۹. تأثیر شستشوی چراغها بر روی افت نور چراغها

همانگونه که در شکل فوق مشخص است چنانچه در سال اول شستشوی چراغها انجام نگیرد افت نور چراغ در حدود ده درصد و چنانچه در دو سال متوالی شستشوی چراغها انجام نگیرد میزان افت نور چراغ به میزان پانزده درصد خواهد بود.

۷- راهکارهای پرهزینه جهت کاهش مصرف انرژی الکتریکی

در این بخش به بررسی راهکارهای پرهزینه جهت کاهش مصرف انرژی الکتریکی در ک پرداخته می شود.

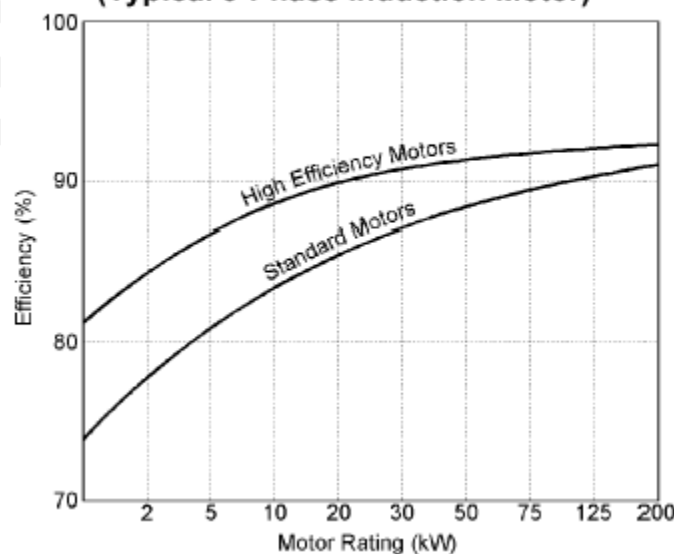
۷-۱. استفاده از موتورهای پربازده

هدف استفاده از الکتروموتورهای پربازده، کاهش تلفات داخلی الکتروموتورها می باشد. تلفات داخلی الکتروموتورها شامل موارد زیر است:

- تلفات مسی که وابسته به جریان بار است.
- تلفات هسته که مقدار ثابتی است و مستقل از جریان بار می باشد.
- تلفات مکانیکی که به سرعت وابسته است ولی مستقل از بار می باشد.

با انتخاب موتورهای الکتریکی پربازده مقادیر تلفات داخلی کمتر خواهد شد. این الکتروموتورها دارای طول هسته بیشتری می باشند و در ساختمان هسته آنها از ورقهای با تلفات کم استفاده شده است. برای کاهش تلفات مس، سطح مقطع هادی بزرگتری برای آنها بکار رفته است و با توجه به اینکه در این الکتروموتورها حرارت کمتری تولید می شود، لذا اندازه فن خنک کاری کوچکتر انتخاب شده که باعث کاهش تلفات مکانیکی آن خواهد شد. در شکل ۱۰ منحنی های بازده الکتروموتورهای استاندارد و الکتروموتورهای پربازده در اندازه های مختلف مقایسه شده اند.

STANDARD vs HIGH EFFICIENCY MOTORS
(Typical 3-Phase Induction Motor)



شکل ۱۰. منحنی بازده موتورهای الکتریکی

استفاده از موتورهای پربازده علاوه بر اینکه دارای راندمان بیشتر نسبت به موتورهای عادی هستند، همچنین جریان های بیشتری را در هنگام راه اندازی تحمل و حرارت و نویز کمتری را تولید می کنند. اما هزینه خرید این موتورها بسیار زیاد می باشد و پیشنهاد می گردد هنگام تعویض موتورهای مستهلک از این راهکار استفاده شود.

۷-۲. استفاده از درایو کنترل دور (VSD) بر روی موتورها

استفاده از تکنولوژی الکترونیک قدرت (*Power Electronic*) به طور مستمر بهره وری و کیفیت فرآیندهای صنعتی مدرن را بی وقفه بهبود می بخشد. تخمین زده می شود که با استفاده از این تکنولوژی، حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد امکان صرفه جویی انرژی الکتریکی وجود دارد.

نیروی محرکه بیشتر پمپ ها و فن ها، موتورهای القایی هستند که در دور ثابت کار می کنند. درایوها دستگاه هایی هستند که توان ورودی با ولتاژ و فرکانس ثابت را به توان خروجی با ولتاژ و فرکانس متغیر تبدیل می کنند. باید توجه کرد که دور یک موتور تابعی از فرکانس منبع تغذیه آن است.

استفاده از موتورهای مجهز به کنترل کننده دور، امکان اعمال تغییرات لازم در سرعت موتور فن یا پمپ را به طور دائم فراهم آورده و بدین ترتیب می توان با توجه به فرآیند مورد نظر از اتلاف انرژی ایجاد شده در اثر تنظیم کننده های مکانیکی جلوگیری کرد. با استفاده از درایو متناسب با بار، هرگونه نیاز به خاموش و روشن کردن موتور و یا ادوات تنظیم کننده نظیر شیر یا دمپر حذف می گردد. همچنین استفاده از درایوها، کنترل دقیق سرعت و متعاقب آن، توان خروجی قابل تنظیم را سبب می شود که با توجه به استفاده از مدارات الکترونیکی، استهلاک قسمت های کنترل کننده در حد بسیار پایین خواهد بود.

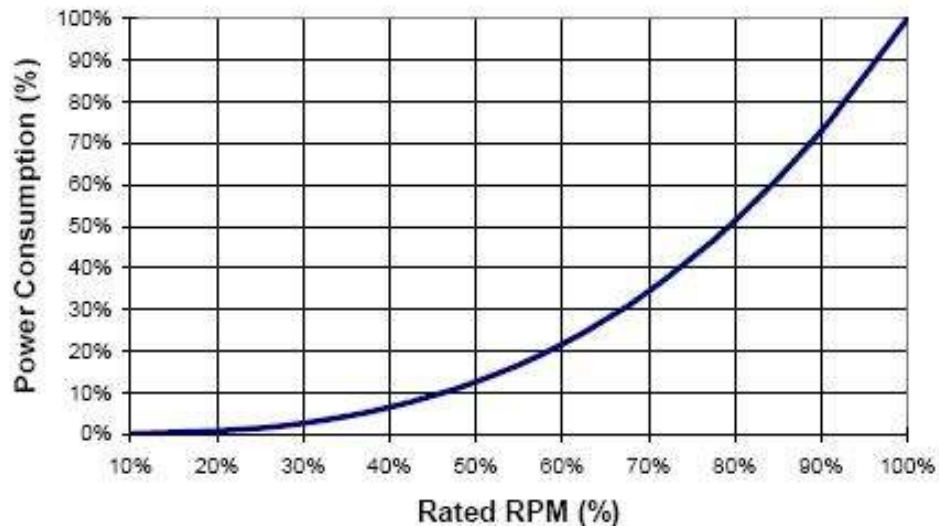
اگر چه هزینه اولیه این سیستم ها نسبتاً زیاد می باشد، ولی صرفه جویی حاصل از افزایش بازدهی در اثر استفاده از موتورهای مجهز به کنترل کننده دور، در طول زمان منجر به صرفه جویی اقتصادی می شود. معمولاً بسته به نوع کاربرد، زمان برگشت سرمایه متغیر خواهد بود.

VSD ها علاوه بر صرفه جویی انرژی دارای مزایای ذیل نیز می باشند:

- کنترل بهتر فرآیند تولید
- افزایش دوام تجهیزات
- راه اندازی نرم (*Soft Start*)
- تصحیح ضریب قدرت
- جلوگیری از ضربات مکانیکی

در فن ها و دمنده ها، دبی سیال با سرعت فن متناسب است. از طرفی مصرف انرژی الکتروموتور با توان سوم سرعت آن متناسب است، بطوریکه با کاهش ۲۰ درصد سرعت، انرژی مصرفی به نصف کاهش پیدا می کند. این مطلب، در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

Motor Power Consumption Vs. Speed Fans and Pumps



شکل ۱۱. مصرف انرژی الکتروموتور فن ها و پمپ ها در سرعت های مختلف موتور

کاهش انرژی الکتروموتور در اثر کم شدن سرعت آن را می توان توسط رابطه زیر بیان کرد:

$$Power_{final} = Power_{initial} \left(\frac{RPM_{final}}{RPM_{initial}} \right)^3$$

بنابراین ملاحظه می گردد که جایگزین کردن فن هایی که با دمپر کنترل می گردند، با موتورهای دور متغیر، کاهش قابل توجهی در مصرف انرژی را به دنبال دارد.

مراجع

۱. (ششمین همایش ملی انرژی-بهینه سازی مصرف انرژی در بخش الکتروموتورهای الکتریکی از طریق بکارگیری الکتروموتورهای رانده مان بالا- محمدرضا قهارپور- نادر سالک گیلانی- داوود سرجی)
- 2- Standard and cogged V-belts. Source: Dayco CPT, www.cptbelts.com
- 3-Michigan Manufacturing Technology Center, Manufacturing Efficiency Decision Support, Case Study - Cog Belts, <http://meds.mmtc.org/casestudy>.
۴. کیفیت توان- تالیف و ترجمه: دکتر سید حسین حسینیان، دکتر عارف درودی
- 5-reducing power factor cost, motor.doe.org
- 6-determining electric motor load and efficiency, motor.doe.org
۷. مرجع کاربردی مدیریت انرژی، تدوین مرکز مطالعات تکنولوژی دانشگاه صنعتی شریف، گروه نفت و انرژی با همکاری شرکت توسعه بهره وری انرژی فناوران، ناشر دانشگاه صنعتی شریف، مرکز مطالعات تکنولوژی ۱۳۸۵