

کاربرد کنترل کننده های دور موتور در صرفه جویی انرژی (1)

بحث انرژی از دو دیدگاه اقتصادی و زیست محیطی حائز اهمیت است. بهینه سازی مصرف انرژی به این معنی است که بتوان با استفاده از تجهیزات و یا مدیریت بهتر همان کار را ولی با مصرف انرژی کمتر انجام بدهیم. صرفه جویی انرژی می تواند با استفاده از تجهیزات بهتر نظیر: عایق بندی مطلوب، افزایش راندمان سیستمهای حرارتی، و بازیابی تلفات حرارتی بدست آید از طرف دیگر اعمال مدیریت انرژی، بمنظور درک سیستمهای موجود و طریقه استفاده از آنها، میتواند در کاهش مصرف انرژی نقش مهمی داشته باشد. در سیاست گذاری انرژی باید سازمانها رویکرد سیستمی داشته باشند. برای مثال در بهینه سازی مصرف انرژی الکتریکی هدف تنها کاهش هزینه های انرژی یک یا چند الکتروموتور مشخص نیست، بلکه باید آثار اقدامات مورد نظر روی سایر سیستمها نیز بدقت مورد توجه قرار گیرد. در یک بنگاه اقتصادی صرفه جویی انرژی میتواند موجب برتری رقابتی بنگاه گردد.

در اغلب بخشهای صنعتی انرژی الکتریکی مهمترین منبع انرژی صنعت بشمار می رود. از آنجا که موتورهای الکتریکی، مصرف کننده اصلی انرژی الکتریکی در کارخانجات صنعتی میباشند. لذا بهینه سازی مصرف انرژی در موتورهای الکتریکی که موضوع مقاله است از اهمیت ویژه ای برخوردار خواهد بود. برای درک اهمیت بهینه سازی مصرف انرژی به این مورد اشاره می کنیم که اگر راندمان موتورهای الکتریکی القایی موجود در اروپا تنها به میزان 1% افزایش یابد، هزینه مصرف انرژی الکتریکی به میزان 1/6 میلیارد دلار در سال کاهش خواهد یافت.

آمار منتشر شده از سوی وزارت نیرو نشان می دهد در سال 1373، 5/38% از کل انرژی الکتریکی مصرف شده در ایران توسط موتورهای الکتریکی بوده است. [F1] البته این میزان در کشورهای صنعتی تا 65% می رسد و شاخص خوبی برای نشان دادن سطح صنعتی شدن یک کشور می باشد [10]. اهداف بهینه سازی مصرف انرژی را میتوان بصورت زیر بیان نمود:

- استفاده منطقی از انرژی
- حفظ منابع انرژی
- اصلاح میزان مصرف انرژی در بخشهای مصرف کننده انرژی
- کاهش گازهای گلخانه ای و آلودگی هوا
- اصلاح وضعیت موجود
- کسب برتری رقابتی در بنگاههای اقتصادی

می توان اقدامات مختلفی برای صرفه جویی انرژی الکتریکی در الکتروموتورهای صنعتی بعمل آورد. در حالت کلی این اقدامات به دو دسته تقسیم میشود:

- 1- اقدامات مربوط به طراحی موتور
- 2- اقدامات مربوط به بهره برداری از موتورها

اقدامات مربوط به بهره برداری از موتورها را نیز میتوان به دو دسته تقسیم نمود:

- 1- اقدامات روی موتور، نظیر تهویه، روغنکاری، و بارگذاری
- 2- استفاده از درایو یا کنترل کننده دور موتور

در این مقاله نخست روشهای بهینه سازی مصرف انرژی در موتورهای الکتریکی را مورد بحث قرار می دهیم سپس کاربرد درایوها در کنترل موتورهای الکتریکی و تأثیری که آنها می تواند در صرفه جویی مصرف انرژی بگذارند مورد بررسی قرار خواهد گرفت

1- مصرف انرژی در موتورهای الکتریکی

در سالهای اخیر بهینه سازی مصرف انرژی در صنایع بدلائل اقتصادی و زیست محیطی اهمیت بیشتری یافته و موجب شده است که اقدامات عملی گسترده ای در این زمینه بعمل آید. علی رغم اینکه یکی از بزرگترین مصرف کنندگان انرژی الکتریکی در بخش صنعت موتورهای الکتریکی می باشند ، لیکن در زمینه افزایش بازدهی مدل‌های انرژی الکتریکی به مکانیکی مستقر در صنایع اقدامات عملی چندانی بعمل نیامده است. بدیهی است که افزایش بازدهی محرک های صنعتی نه تنها از نظر اقتصادی مورد توجه استفاده کنندگان می باشد بلکه در برنامه ریزی انرژی در سطح ملی نیز حائز اهمیت است.

مطالعات انجام شده در صنایع ایران حکایت از وضعیت نابسامان انتخاب و بهره برداری از موتورهای الکتریکی دارد. [F1] بر اساس این تحقیقات اغلب موتورها بزرگتر از میزان نیاز انتخاب شده و در شرایط بدی نگهداشت میشوند. استفاده از موتورهای با راندمان بالا در ایران رایج نبوده و گزارش موثری از استفاده از درایو جهت صرفه جویی انرژی در دست نیست. کاربردهای صنعتی بسیاری می توان یافت که موتورها در بازدهی بسیار پایین تر از مقدار حداکثر قرار دارند. بعنوان مثال در یکی از کارخانجات صنعتی کشورمان در یک مورد ، متوسط توان مصرفی در یک موتور القائی سه فاز صنعتی تنها 28% توان نامی اندازه گیری شده است. [F1] بدیهی است پایین بودن توان خروجی، تا این حد تأثیرات منفی قابل توجهی بر بازدهی و ضریب توان موتور خواهد داشت. از سوی دیگر دولت نیز نتوانسته است در ترویج فرهنگ استفاده بهینه از انرژی الکتریکی توفیقات خوبی داشته باشد. بعنوان مثال وزارت نیرو و سازمانهای وابسته به آن که مشخصا در زمینه بهینه سازی مصرف انرژی الکتریکی در سطح کلان عمل میکنند هنوز در ارتباط با کاهش مصرف داخلی نیروگاهها اقدام موثری بعمل نیاورده است. در حالیکه پتانسیل صرفه جویی انرژی الکتریکی زیادی در نیروگاهها وجود دارد.

2- موانع در سیاست گذاری انرژی

در ایران موانعی که سر راه بهینه سازی مصرف انرژی الکتریکی وجود دارد را میتوان بصورت زیر دسته بندی نمود:

- سیاست دولت در پرداخت سوبسید به صنایع
- عدم آگاهی مدیران صنایع از روشهای صرفه جویی انرژی الکتریکی
- ضعف دانش فنی مهندسیین مرتبط با بهینه سازی مصرف انرژی
- نگرانی از ضریب اطمینان درایو و آثار منفی آن روی شبکه و موتور
- نداشتن یک رویکرد سیستمی در استفاده از موتورهای با راندمان بالا

3- انتخاب موتور مناسب

موتورهای القائی سه فاز و یک فاز به دلیل تنوع مصرف در کاربردهای زیادی مورد استفاده قرار می گیرند. مشخصه های بارمکانیکی ناشی از کاربرد و مورد مصرف می باشد. بدیهی است موتور در صورتی می تواند بار مکانیکی متصل به آن را تامین کند که مشخصه عملکردی موتور منطبق بر مشخصه بار مکانیکی باشد.

1-3 تطابق موتور و بار

همانطور که در بالا اشاره شد موتور و بار دارای مشخصه های خاص خود می باشند. منظور از تطابق بین موتور و بار انطباق بین مشخصه های موتور و مشخصه های بار متصل به محور موتور میباشد.

مشکل اصلی در صنایع کشور آن است که در اغلب موارد تطابق مطلوبی بین مشخصه های بار و موتور وجود ندارد. توان اغلب موتورها بیش از بار متصل به محور شان می باشد و با توجه به اینکه قیمت تمام شده موتور متناسب با توان آن می باشد، لذا بدیهی است انتخاب موتور با توان بیش از نیاز بار، علاوه بر افزایش هزینه اولیه موتور موجب افزایش سایر هزینه ها از قبیل کابل کشی و نصب و راه اندازی و تعمیر خواهد شد.

از طرف دیگر در صورتیکه موتور انتخاب شده بزرگتر از حد لازم باشد در این صورت موتور در حالت بار کامل و یا نزدیک به بار کامل کار نکرده و لذا بازدهی آن پایین تر از مقدار حداکثر آن خواهد بود. و خود این امر اشکالات جدی در بهینه سازی مصرف انرژی ایجاد خواهد کرد.

در موتورهای القایی سه فاز در صورت کاهش میزان بازدهی موتور، به ویژه به میزان کمتر از 80% بار کامل، شاهد کاهش قابل توجه در بازدهی موتور خواهیم بود. متأسفانه در اکثر موارد به این نکته توجه نشده و تنها تأثیر نامطلوب انتخاب موتور بزرگتر از حد لازم بر هزینه اولیه مورد توجه قرار می گیرد. در صورتیکه محاسبات انجام شده حاکی از آن است که تأثیر انتخاب نامناسب موتور بر هزینه های متغیر (هزینه اتلاف انرژی اضافی) قابل توجه و بمراتب بیش از افزایش هزینه ثابت اولیه می باشد. یک مثال این موضوع را روشن خواهد کرد:

مثال: فرض می کنیم برای انجام یک کار مکانیکی، موتور القایی سه فاز با توان خروجی 110 کیلو وات مناسب باشد و بجای آن موتور با توان 132 کیلو وات انتخاب شود. اطلاعات زیر را مورد توجه قرار می دهیم:

- بازدهی موتور در بار کامل = 94/2 %
- بازدهی موتور در 83/3 % بار کامل = 92/5 %
- طول عمر مفید موتور = 15 سال
- ضریب کارکرد = 0/8

با انجام کمی محاسبات می توان نتیجه گرفت که مصرف انرژی در طول 15 سال بمقدار 937/600 کیلو وات ساعت افزایش پیدا خواهد کرد. مطالب فوق این واقعیت را بیان می کند که انتخاب موتور مناسب به لحاظ اقتصادی حائز اهمیت فراوان بوده و لذا تطابق بین بار و موتور از اهمیت ویژه ای برخوردار است. انتخاب موتور بزرگتر از حداقل مورد نیاز به دلایل زیر غیر اقتصادی می باشد:

- 1- با افزایش توان موتور قیمت آن یعنی هزینه اولیه افزایش می یابد.
- 2- با افزایش توان موتور هزینه های نگهداری و تعمیرات آن افزایش می یابد.
- 3- با افزایش توان موتور بدلیل پایین آمدن ضریب بار، بازدهی موتور کاهش یافته و بدین ترتیب انرژی تلف شده افزایش می یابد.

3-2- موتورهای با راندمان بالا (Energy Efficient Motors)

گرچه قیمت موتورهای با راندمان بالا بیشتر از موتورهای استاندارد است، ولی در اغلب کاربردها استفاده از آنها کاملاً اقتصادی است. مخصوصاً در کاربردهائی که:

- مدت زمان روشن بودن موتور بیش از زمان خاموش بودن آن باشد
- مدت زمان روشن بودن موتور بیش از 2000 ساعت در سال باشد
- گشتاور بار نسبتاً ثابت بوده و موتور بدرستی به بار تطبیق شده باشد.

استفاده از موتورهای با راندمان بالا توصیه میشود. پارهائی چون میکسرها، نقاله ها و فیدرها از این نوع هستند. اهمیت موضوع وقتی آشکار میشود که توجه کنیم که هزینه انرژی مصرفی یک الکتروموتور در طول عمر مفید آن 10 تا 20 برابر قیمت موتور است [16]. موتورهای با راندمان بالا علاوه بر صرفه جوئی انرژی معمولاً مزیت های دیگری نیز دارند. برای مثال آنها جریان های بیشتری را در هنگام راه اندازی تحمل میکنند و حرارت و نویز کمتری تولید میکنند. هر چند که موتورهای با راندمان بالا تنها 2 تا 3 درصد راندمان را بهبود میدهند، اما اگر در انتخاب و بکارگیری آنها بجای یک موتور کل سیستم در نظر گرفته شود، اثر بخشی کار بالا خواهد رفت. با رویکرد سیستمی به موضوع و در نظر گرفتن عوامل دیگر نظیر هزینه های تعمیر و نگهداشت و بهره برداری میتوان به کارائی این موتورها بیشتر پی برد. میزان صرفه جوئی انرژی در

صورت استفاده از موتور با راندمان بالا، به جای موتورهای استاندارد از رابطه زیر قابل محاسبه است:

در رابطه فوق hp توان موتور بر حسب اسب بخار، ضریب بار (در صد از بار کامل تقسیم بر 100)، hr ساعات کار در طول سال، c متوسط قیمت انرژی (قیمت هر ee راندمان موتور با راندمان موتور استاندارد (%))، و η کیلووات ساعت انرژی، راندمان بالا (%) است.

توصیه میشود هنگام خرید موتور و یا سفارش ساخت ماشین به سازندگان ماشین از موتورهای با راندمان بالا استفاده گردد. همچنین معمولاً اقتصادی است که بجای سیم پیچی کردن موتورهای سوخته و استفاده مجدد از آنها، از موتورهای با راندمان بالا استفاده گردد. زمان بازگشت سرمایه (به سال) در خرید این نوع موتورها، بطور ساده عبارت خواهد بود از:

4- اقدامات مورد نیاز برای بهبود عملکرد سیستمهای مرتبط با الکتروموتورها

یک موتور معمولاً با اجزا و سیستمهای دیگر در ارتباط است. برای بهبود عملکرد الکتروموتورها لازم است سیستمهای مرتبط با موتور نیز در نظر گرفته شود. این سیستمها شامل شبکه برق، کنترل کننده های موتور، الکتروموتور و سیستم انتقال نیرو میگردد.

4-1- کیفیت توان Power Quality

مسائل کیفیت توان شبکه شامل کلیه اختلالات شبکه برق مثل عدم تقارن در ولتاژ، افت ولتاژ، چشمک زدن، اسپایک، سیستم ارت بد، هارمونیکها و نظایر آن میشود [5]. از آنجا که کیفیت توان تاثیر زیادی در اتلاف انرژی دارد، لازم است یک مهندس مجرب وضعیت شبکه برق تاسیسات را زیر نظر داشته باشد.

4-2- تثبیت ولتاژ شبکه

تا آنجا که ممکن است باید ولتاژ اعمالی به موتور نزدیک به ولتاژ کار موتور باشد. گرچه تغییرات 10% در ولتاژ موتور مجاز است اما از نقطه نظر اتلاف انرژی میزان انحراف از ولتاژ نامی موتور باید کمتر از 5% باشد. تغییر ولتاژ موتور موجب افت ضریب قدرت، عمر مفید موتور و راندمان میگردد [6]. شکل(1)

شکل(1): بررسی تاثیر تغییرات ولتاژ اعمالی به موتور روی تورک، جریان راه اندازی، جریان بار کامل، راندمان و ضریب قدرت

اگر ولتاژ موتور بیش از 5% کاهش پیدا کند، راندمان بین 2 تا 4 درصد افت پیدا کرده و دمای موتور حدود 15 درجه افزایش می یابد و این افزایش دما عمر عایق موتور را کاهش خواهد داد. در شکل(2) عمر موتور در دماهای کار مختلف و با کلاسهای عایقی مختلف نشان داده شده است.

شکل (2): بررسی تاثیر دمای کلافهای موتور روی عمر مفید آن برای موتورهای با کلاس عایقی مختلف

4-3- عدم تقارن فاز

عدم تقارن فاز باید کمتر از 1% باشد. عدم تقارن فاز بصورت زیر توسط NEMA تعریف شده است:

برای مثال اگر ولتاژهای فاز بترتیب 462 و 463 و 455 ولت باشد. متوسط ولتاژ سه فاز برابر با 460 ولت میشود و در صد عدم تقارن بصورت زیر محاسبه خواهد شد:

ضرب قدرت

ضرب قدرت پائین موجب افزایش جریان کابلها و ترانسفورماتورها و افت ولتاژ شده و بدین ترتیب باعث کاهش ظرفیت سیستم تغذیه میشود. [7] ضرب قدرت پائین ناشی از بار کم در شفت موتور است. در شکل (3) منحنیهای ضرب قدرت برای بارهای مختلف و رنجهای توانی متفاوت موتورها آمده است [8]. بوضوح مشاهده میشود با کاهش بار موتور ضرب قدرت تغییرات قابل توجهی میکند.

5- روشهای عملی برای افزایش بازدهی موتور

اشاره شد که بالا بردن بازدهی متوسط موتورهای القایی به لحاظ اقتصادی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. بدیهی است نحوه عمل و دستیابی به نتایج مطلوب وابسته به نوع و اندازه موتور، شرایط بارگذاری، نحوه نگهداری و غیره بوده و لذا نمی توان دستور العمل کلی برای ارتقاء بازدهی کلیه موتورهای القایی ارائه داد. بطور کلی اقدامات لازم برای بالا بردن بازدهی موتورهای القایی را می توان به دو دسته تقسیم نمود. دسته اول تمهیداتی است که در زمان طراحی و ساخت موتور باید بکار گرفت. دسته دوم شامل مجموعه اقدامات عملی جهت بالا بردن بازدهی موتورهای القایی در حال کار در صنایع می شود.

اقدامات عملی ساده ای منجر به افزایش راندمان کار می گردد به عنوان مثال مقدار معمول جریان بی باری در موتورهای القایی سه فاز در محدوده 3 تا 5 درصد جریان نامی موتور است. ولی در بررسی های بعمل آمده مشاهده شده است که در اکثر موارد جریان بی باری موتور بیشتر از این مقدار بوده و در برخی موارد تا 12% جریان نامی افزایش یافته است. این افزایش در جریان بی باری موتور بعلت عدم نگهداری صحیح از موتور است. در اکثر موارد این شرایط نامطلوب در حالات بارگذاری نیز مشاهده می شود. به این معنی که با اعمال بار مکانیکی غیر مفید به محور موتور، بصورت اصطکاکهای مکانیکی ناشی از عدم نگهداری صحیح، موجب میشود که موتور بار اعمال شده را در جریان الکتریکی بیشتری تامین می کند. و در واقع بخشی از توان الکتریکی ورودی صرف تامین بار و قسمت دیگر آن برای غلبه بر اصطکاک مکانیکی مصرف می شود.

بدین ترتیب موارد زیر را در ارتباط با تلفات اهمی موتور میتوان بیان کرد:

- 1- تلفات اهمی موتور متغیر بوده و تابعی از میزان و نحوه بارگذاری موتور می باشد.
- 2- در بسیاری از موارد عدم نگهداری صحیح از قسمتهای چرخان موتور به ویژه بلبرینگ محور موتور، موجب ایجاد بار مجازی ناشی از افزایش اصطکاک مکانیکی شده و لذا جریان ورودی موتور در حالت بی باری و بار از حد مطلوب و اعلام شده توسط سازنده بیشتر خواهد شود
- 3- افزایش جریان ورودی موتور موجب بالا رفتن تلفات اهمی و حرارت ایجاد شده در سیم پیچ شده و لذا درجه حرارت اطراف سیم پیچ افزایش خواهد یافت.

از مشخصات بارز تلفات مکانیکی موتور دشاری محاسبه میزان و تعیین منابع آن است. بخش عمده تلفات مکانیکی در قسمت های چرخان موتور بوده و ناشی از اصطکاک و بار می باشد و لذا میزان تلفات مکانیکی تا حد زیادی وابسته به شرایط نگهداری موتور دارد. با روغن کاری مناسب و بموقع بلبرینگ و نظافت قسمتهای چرخان موتور و همچنین اطمینان از بالانس بودن محور، میتوان تلفات مکانیکی موتور را به حداقل رساند بدین ترتیب در ارتباط با تلفات مکانیکی موتور میتوان موارد زیر را اظهار داشت:

- 1- میزان تلفات مکانیکی تابعی از شرایط نگهداری موتور می باشد.
- 2- با انجام اقدامات مناسب در نگهداری موتور می توان تلفات مکانیکی را بسادگی در مقدار حداقل خود نگه داشت.

- 3- تلفات مکانیکی نیز منجر به افزایش درجه حرارت بویژه در قسمت‌های چرخان موتور می شود

انواع تلفات موتور بدون توجه به نوع آن منجر به ایجاد حرارت می شود بدین ترتیب خنک کاری موتور بویژه در شرائطی که موتور زیر بار است از اهمیت ویژه ای برخوردار است . بالا رفتن درجه حرارت موتور باعث کاهش عمر مفید آن می شود. در موارد زیادی مشاهده شده است که بدلیل عدم رعایت نکات ساده و مهم در نگهداری موتور باعث کاهش بازدهی سیستم خنک کن شده و درجه حرارت موتور در حالت بار نامی افزایش پیدا کند . در این گونه موارد گاهی اوقات بجای رفع اشکال نگهداری، اقدام به جایگزین کردن موتور یا توان بیشتر می شود که این امر خود منجر به کاهش بازدهی سیستم و اتلاف انرژی خواهد شد .

بر اساس تجارب شرکت پرتو صنعت نوع دیگری از اشکالات مربوط به سیم پیچی موتورهای معیوب توسط افراد غیر متخصص می شود. مشاهدات ما نشان می دهد که در برخی از موارد موتور بدفعات مورد سیم پیچی قرار می گیرد . عدم رعایت نکات فنی در عایق بندی موتور سیم پیچی شده و همچنین استفاده از ابزار و آلات غیر اصولی در درآوردن سیم پیچی سوخته شده موتور نتایج بدی بدنبال دارد.

بعنوان يك اصل تجربی موتورهای که به این شیوه سیم پیچی مجدد می شوند برای کار با اینورتر یا کنترل کننده دور موتور مناسب نیستند. اغلب این موتورها بدلیل آسیب هایی که به مدار مغناطیسی آنها در حین سیم پیچی وارد می شود از جریان بی باری بالاتر از حد معمول برخوردار بوده و عایق بندی آنها برای کار با اینورتر مناسب نمی باشد . این نوع موتورها حرارت بیشتری نسبت به موتورهای سالم دارند و تلفات انرژی زیادی ایجاد می کنند . ضمناً این موتورها بمراتب آسیب پذیرتر از موتورهای فابریک می باشند . توصیه می شود در سیم پیچی موتورهای آسیب دیده از تکنیسین های مجرب و ابزارآلات مناسب استفاده شود . ضمناً تا زمانی که اطمینان از فرآیند کار حاصل نشده باشد از استفاده از این نوع موتورها همراه با کنترل کننده دور موتور اجتناب گردد .

توصیه می شود اگر قصد تعویض این نوع موتورها را دارید و یا میخواهید موتورهای جدیدی تهیه کنید، موتورهای تهیه کنید که راندمان بالاتری داشته باشند .

6- دستور العملهای لازم برای بهبود عملکرد موتورهای الکتریکی

اشاره شد که عوامل موثر در بازدهی موتورهای الکتریکی را می توان بصورت زیر بیان نمود:

- عوامل موثر در مراحل طراحی و ساخت
- عوامل موثر در بهره برداری

بررسی عوامل موثر فوق خارج از حوصله این مقاله است. یک مطالعه خوب از عوامل فوق توسط آقای دکتر اوروعی در سال 1373 انجام گرفته است [F1]. در اینجا بطور خلاصه به عوامل موثر در بهره برداری از موتور که به افزایش بازدهی آنها منجر خواهد شد اشاره میشود. در جدول (1) خلاصه ای از عوامل موثر در بازدهی موتورهای الکتریکی آمده است.

جدول (1) عوامل موثر در بازدهی موتورهای الکتریکی

همان طور که مشاهده می شود مجموعه اقدامات ساده فوق خصوصاً اقداماتی که به عوامل وابسته به شرایط نگهداری موتور می شود می تواند منجر به صرفه جویی اقتصادی قابل توجهی شود.

برای اطمینان یافتن از اینکه بازدهی موتورهای مستقر در صنایع و سایر کاربردها در حد مطلوب قرار دارد می توان نسبت به تدوین شناسنامه صنعتی برای هر موتور (و

بوژه موتورهای بزرگ) اقدام نموده و با ثبت اطلاعات مورد نظر از جمله موارد زیر بازدهی این موتور ها را مورد بررسی قرار داد:

- میزان بار (درصد از بار کامل)
- میزان تغییرات بار (درصد از بار کامل)
- میزان تغییرات سرعت (درصد از سرعت سنکرون)
- میزان تغییرات ولتاژ شبکه (درصد از ولتاژ نامی)

توصیه میشود کارخانجاتی که در آنها تعداد موتور مورد استفاده زیاد می باشد نسبت به جمع آوری اطلاعات فوق و اقدامات اصلاحی اقدام نمایند.

7-دسته بندی اقدامات لازم برای بهینه سازی مصرف انرژی

برای روشن شدن تاثیر اقدامات مختلف برای افزایش بازدهی موتورهای الکتریکی در جدول (2) نتایج قابل انتظار این اقدامات برای دسته ای از موتورهای القایی با توان خروجی 2/2 تا 30 کیلو وات نمایش داده شده است. [F1]

جدول (2) : اقدامات مختلف برای افزایش بازدهی موتورهای الکتریکی با توان 2/2 تا 30 کیلو وات.

8-تکنولوژی الکترونیک قدرت و درایوهای AC

تکنولوژی الکترونیک قدرت (Power Electronics)، بهره وری و کیفیت فرایندهای صنعتی مدرن را بی وقفه بهبود میبخشد. امروزه با کمک همین تکنولوژی امکان استفاده از منابع انرژی غیرآلاینده بازیافتی (Renewable Energy)، نظیر باد و فتو ولتائیک فراهم شده است. تخمین زده میشود که با استفاده از الکترونیک قدرت، حدود 15 تا 20 درصد امکان صرفه جویی انرژی الکتریکی وجود دارد [17]. در واقع با کاهش بیوقفه قیمت ها در عرصه الکترونیک قدرت زمینه برای حضور آنها در کاربردهای صنعتی، حمل و نقل و حتی خانگی فراهم میگردد.

نیروی محرک بیشتر پمپها و فن ها موتورهای القایی هستند که در دور ثابت کار میکنند. لیکن در سالهای اخیر با پیشرفتهای انجام گرفته در زمینه تکنولوژی الکترونیک قدرت ، استفاده از موتورهای القایی قفس سنجایی همراه با کنترل کننده دور موتور (AC DRIVE) یا اینورتر یا بطور ساده درایو) رو به گسترش است . درایوها دستگاههایی هستند که توان ورودی با ولتاژ و فرکانس ثابت را به توان خروجی با ولتاژ و فرکانس متغیر تبدیل میکنند. باید توجه کرد که دور یک موتور تابعی از فرکانس منبع تغذیه آن است. برای این منظور یک درایو نخست برق شبکه را به ولتاژ DC تبدیل کرده و سپس آنرا با استفاده از یک اینورتر مجدداً به ولتاژ AC با فرکانس و ولتاژ متغیر تبدیل میکند. در شکل (4) قسمتهای اصلی یک درایو ولتاژ پائین نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میکنید قسمت اینورتر متشکل از سوئیچهای قدرتی است که در سالهای اخیر تغییرات تکنولوژیک زیادی پیدا کرده اند. در واقع با معرفی سوئیچهای قدرتی چون IGBT با قیمتهای رو به کاهش، زمینه برای عرضه درایوهای با قیمت مناسب فراهم شد. در هر حال خاطر نشان میکنیم که شکل موج خروجی درایو ترکیبی از پالسهای DC با دامنه ثابت است. این موضوع موجب میشود که خود درایو منشأ اختلالاتی در کار موتور شود. برای مثال کیفیت شکل موج خروجی درایو میتواند سبب اتلاف حرارتی اضافی ناشی از مولفه های هارمونیک فرکانس بالا در موتور شده و یا موجب نوسانات گشتاور Torque Pulsation در موتور گردد. با این حال درایوهای امروزی بدلیل استفاده از سوئیچهای قدرت سریع این نوع مشکلات را عملاً حذف کرده اند.

شکل (4): ساختمان یک کنترل کننده دور موتور (فقط قسمتهای قدرت نشان داده شده است).

کنترل کننده های دور موتورهای الکتریکی هر چند که ادوات پیچیده ای هستند ولی چون در ساختمان آنها از مدارات الکترونیک قدرت استاتیک استفاده می شود و فاقد قطعات متحرک می باشند، از عمر مفید بالایی برخوردار هستند. مزیت دیگر کنترل کننده های دور موتور توانایی آنها در عودت دادن انرژی مصرفی در ترمزهای مکانیکی و یا مقاومت های الکتریکی به شبکه می باشد. در چنین شرایطی با استفاده از کنترل کننده های دور مدرن می توان از اتلاف این نوع انرژی جلوگیری نمود. بطوریکه در برخی کاربردها قیمت انرژی بازیافت شده از این طریق، در کمتر از یکسال معادل هزینه سرمایه گذاری سیستم بازیافت انرژی می شود.

9- کنترل کننده های دور موتور

تا اینجا در مورد مجموعه اقداماتی که برای بهینه سازی مصرف انرژی میتوانستیم روی موتورهای الکتریکی اعمال کنیم بحث شد. اشاره شد که در کشور ایران در سال 73 بیش از 35 درصد مصرف انرژی در موتورهای الکتریکی بخش صنعت بوده است. البته این مقدار در کشورهای صنعتی تا 65 درصد نیز میرسد. این امر اهمیت بهینه سازی مصرف انرژی در موتورهای الکتریکی را نشان میدهد. در این قسمت از مقاله در مورد تاثیر استفاده از کنترل کننده های دور موتور در کاهش مصرف انرژی صحبت خواهیم کرد. سعی میکنیم با استفاده از تعدادی مثال اهمیت

موضوع را نشان دهیم. بطور خلاصه در کاربردهای صنعتی زیادی، صرفه جوئی که با استفاده از کنترل کننده دور موتور در مصرف انرژی حاصل میشود بمراتب بیشتر از اقدامات برشمرده در قسمتهای قبلی مقاله است.

استفاده از موتورهای مجهز به کنترل کننده دور موتور، امکان اعمال تغییرات لازم در سرعت موتور فن و یا پمپ را بطور دائم فراهم آورده و بدین ترتیب می توان با توجه به فرآیند مورد نظر از اتلاف انرژی ایجاد شده در تنظیم کننده های مکانیکی جلوگیری نمود. با استفاده از درایو موتور به بار تطبیق داده شده، و هر گونه نیاز به خاموش و روشن کردن موتور و یا ادوات تنظیم کننده نظیر شیر یا دمپر حذف می گردد. همچنین کنترل سرعت دقیق و متعاقب آن توان خروجی قابل دسترسی بوده و با توجه به استفاده از مدارات الکترونیکی، استهلاک قسمتهای کنترل کننده در حد بسیار پایین خواهد بود. تصمیم گیری در مورد استفاده از موتور با کنترل کننده دور متغییر بستگی به نوع کاربرد مورد نظر دارد. از آنجا که هزینه اولیه این سیستمها (کنترل کننده دور موتور) بیش از سایر روشها می باشد و با توجه به اینکه صرفه جوئی ناشی از بالا بودن بازدهی تنها بصورت کاهش هزینه راهبری نمایان می شود، لذا استفاده از موتورهای مجهز به کنترل کننده دور در طول زمان منجر به صرفه جوئی اقتصادی می شود. معمولاً بسته به نوع کاربرد زمان بازگشت سرمایه گذاری بین یک تا سه سال متغیر خواهد بود.

متأسفانه در اکثر موارد مهمترین عامل در انتخاب محرک قیمت اولیه است. بدین معنی که سیستم بر مبنای کمینه سازی هزینه اولیه انتخاب می شود. در حالیکه در طول عمر مفید آن هزینه قابل توجهی صرف انرژی تلف شده و یا تعمیر و نگهداری می شود

در شکل (5) میزان استفاده از کنترلرهای دور متغیر نشان داده شده است.

کنترل کننده های دور موتور انواع مختلفی دارند. آنها قادرند انواع موتورهای AC و DC را کنترل کنند. قیمت کنترلرها وابسته به نوع تکنولوژی بکار رفته در ساختمان آنها میباشد. ساده ترین روش کنترل موتورهای AC روش تثبیت نسبت ولتاژ به فرکانس (یا کنترل V/F ثابت) میباشد. اینک این روش، بطور گسترده در کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار میگیرد. این نوع کنترلرها از نوع اسکالر بوده و بصورت حلقه باز با پایداری خوب عمل میکنند. مزیت این روش سادگی سیستمهای کنترلی آن است. در مقابل این نوع کنترلرها برای کاربردهای با پاسخ سریع مناسب نمیشوند.

روباتها و ماشینهای ابزار نمونه هائی از کاربردهای با دینامیک بالا هستند. در این کاربردها روشهای کنترلی برداری استفاده میشود. در روشهای کنترلی برداری با تفکیک مولفه های جریان استاتور به دو مولفه تورک ساز و فلو ساز، و کنترل آنها با استفاده از رگولاتورهای PI ترتیبی داده میشود که موتور AC نظیر موتور DC کنترل شود. و بدین ترتیب تمام مزایای موتور DC از جمله پاسخ گشتاور سریع آنها در موتورهای AC نیز در دسترس خواهد بود. برای مثال پاسخ گشتاور در روشهای برداری حدود 10 – 20 ms و در روشهای کنترل مستقیم گشتاور (Direct Torque Control) این زمان حدود 5 ms است. اینک روشهای کنترل برداری متعددی پیاده سازی شده است که بررسی آنها خارج از حوصله این مقاله است. در هر حال نوع کنترلر مطلوب، متناسب با کاربرد انتخاب میگردد. در شکل (6) خلاصه ای از انواع روشهای کنترل موتورهای AC نمایش داده شده است.

شکل (6): خلاصه ای از انواع روشهای کنترل موتورهای AC

10- مزایای استفاده از کنترل کننده های دور موتور

مزایای استفاده از کنترل کننده های دور موتور هم در بهبود بهره وری تولید و هم در صرفه جوئی مصرف انرژی در کاربردهائی نظیر فنها، پمپها، کمپروسورها و دیگر محرکه های کارخانجات، در سالهای اخیر کاملاً مستند سازی شده است. کنترل کننده های دور موتور قادرند مشخصه های بار را به مشخصه های موتور تطبیق دهند. این اسباب توان راکتیو ناچیزی از شبکه میکشند و لذا نیازی به تابلوهای اصلاح ضریب بار ندارند. در زیر به مزایای استفاده از کنترل دور موتور اشاره میشود:

- 1- در صورت استفاده از کنترل کننده های دور موتور بجای کنترلرهای مکانیکی، در کنترل جریان سیالات، بطور مؤثری در مصرف انرژی صرفه جوئی حاصل میشود. این صرفه جوئی علاوه بر پیامدهای اقتصادی آن موجب کاهش آلاینده های محیطی نیز میشود.
- 2- ویژگی اینکه کنترل کننده های دور موتور قادرند موتور را نرم راه اندازی کنند موجب میشود علاوه بر کاهش تنشهای الکتریکی روی شبکه، از شوکهای مکانیکی به بار نیز جلوگیری شود. این شوکهای مکانیکی میتوانند باعث استهلاک سریع قسمتهای مکانیکی، بیرینگها و کولپینگها، گیرکس و نهایتاً قسمتهائی از بار شوند. راه اندازی نرم هزینه های نگهداری را کاهش داده و به افزایش عمر مفید محرکه ها و قسمتهای دوار منجر خواهد شد.
- 3- جریان کشیده شده از شبکه در هنگام راه اندازی موتور با استفاده از درایو کمتر از 10% جریان اسمی موتور است.
- 4- کنترل کننده های دور موتور نیاز به تابلوهای اصلاح ضریب قدرت ندارند.
- 5- در صورتی که نیاز بار ایجاب کند با استفاده از کنترل کننده دور، موتور میتواند در سرعتهای پایین کار کند. کار در سرعتهای کم منجر به کاهش هزینه های تعمیر و نگهداشت ادواتی نظیر بیرینگها، شیرهای تنظیم کننده و دمپرها خواهد شد.
- 6- یک کنترل کننده دور قادر است رنج تغییرات دور را، نسبت به سایر روشهای مکانیکی تغییر دور، بمیزان قابل توجهی افزایش دهد. علاوه بر آن از مسائلی چون لرزش و تنشهای مکانیکی نیز جلوگیری خواهد شد.
- 7- کنترل کننده های دور مدرن امروزی با مقدرات نرم افزاری قوی خود قادرند راه حلهای متناسبی برای کاربردهای مختلف صنعتی ارائه دهند.

11- مدیریت بهینه سازی مصرف انرژی و نقش کنترل کننده های دور موتور

امروزه در کشورهای صنعتی الزامات زیست محیطی از یکسو و رقابت بنگاههای اقتصادی از سوی دیگر، مدیریت بهینه سازی انرژی را در صورتیکه امر غیر قابل اجتناب در آورده است. مجموعه اقداماتی که برای صرفه جوئی انرژی در کارخانجات صورت میگیرد شامل مواردی چون جایگزینی موتورهای الکتریکی با انواع موتورهای با زدهی بالا، استفاده از کنترل کننده های دور موتور در کاربردهائی که ائتلاف انرژی در آنها زیاد است، بازیافت انرژی از پروسه های حرارتی و نظایر آنها میشود. نتایج اعمال چنین اقداماتی نشان میدهد در موارد زیادی، و بخصوص در جاهائی که از فنها، پمپها، و کمپروسورها در فرایند تولید استفاده میشود، بکارگیری کنترل کننده های دور

موتور علاوه بر انعطاف پذیر نمودن کنترل فرایند، تاثیر قابل توجهی در کاهش مصرف انرژی داشته است. در بسیاری از موارد زمان بازگشت سرمایه بین يك تا سه سال می باشد.

کتر از 10% موتورهای مجهز به درایو هستند. در حالیکه در بیش از 25% آنها استفاده از درایو توجیه اقتصادی دارد [16].

بر اساس مطالعات انجام گرفته توسط اتحادیه اروپا [10] تا سال 2005 میلادی پتانسیل صرفه جوئی انرژی بالغ بر 63.5 TWh در صنایع کشورهای عضو اتحادیه اروپا وجود دارد. که از این میزان بیش از 44.7 TWh آن توجیه اقتصادی دارد. این میزان صرفه جوئی انرژی تنها در سایه استفاده از موتورهای با راندمان بالا و درایو بدست میاید. که سهم درایو در صرفه جوئی دارای توجیه اقتصادی حدود 63% است. نتایج چنین مطالعاتی را بطور خلاصه در جدول (3) مشاهده میکنید.

جدول (3): پتانسیل فنی و اقتصادی صرفه جوئی انرژی با استفاده از موتورهای با راندمان بالا (EEM) و کنترل دور (VSD) در کشورهای عضو اتحادیه اروپا تا سال 2005. مطالعه فوق با تفکیک بار پتانسیل اقتصادی صرفه جوئی انرژی را نیز در اتحادیه اروپا مشخص نموده است. که نتایج آنرا در شکل (7) مشاهده میکنید.

شکل (7): پتانسیل صرفه جوئی اقتصادی در کشورهای عضو اتحادیه اروپا به تفکیک نوع بار

12- پمپها و فنها

چیزی حدود 40 درصد انرژی مصرفی در بخش صنعت در پمپها و فنها مصرف میشود. برای مثال در انگلستان ترکیب مصرف کنندگان انرژی در موتورهای و در کاربردهای صنعتی بصورت زیر است [15].

شکل (8): میزان انرژی مصرفی توسط بارهای مختلف در انگلستان اغلب این سیستمها از موتورهای القائی با روتور قفس سنجابی استفاده میکنند. و خروجی توسط ادواتی چون شیرهای تنظیم کننده و دمپرها کنترل میشوند. متأسفانه مقادیر قابل توجهی انرژی توسط این فنها و پمپها تلف میشوند. موتورهای بکار رفته در اغلب این ادوات از مقدار مورد نیاز بزرگتر بوده و سیستمهای مکانیکی تنظیم کننده جریان سیالات در آنها بسیار تلفاتی میباشند. به این عوامل باید هزینه های قابل توجه تعمیر و نگهداشت نیز اضافه شود. با توجه به اینکه هزینه های خرید پمپ معمولاً کمتر از 5 درصد هزینه های بهره برداری آن در طول عمر سیستم پمپ است، کیفیت بهره برداری عامل مهمتری در تصمیم گیری برای انتخاب سیستمهای پمپ بشمار میرود.

شکل (9): مقایسه انرژی مصرفی کنترل فلو با شیر و درایو انتخاب پمپها معمولاً بر اساس حداکثر دبی مورد انتظار صورت میگیرد. در حالیکه اغلب اوقات هرگز فلوئی ماکزیمم مورد استفاده قرار نمیگیرد. این امر منجر به بزرگ شدن پمپها شده و بدین ترتیب مقدمات کار برای اتلاف انرژی و استهلاک هر چه سریعتر سیستمهای پمپ فراهم میشود. اگر یک پمپ در دور نامی خود کار کند و دبی خروجی پمپ به مصرف برسد سیستم در راندمان مطلوب خود کار خواهد کرد. اما اگر تنها 50 درصد دبی حداکثر مورد نیاز باشد چه اتفاقی خواهد افتاد؟ بدیهی است که در این حالت نیز موتور در دور نامی خود کار خواهد کرد و توان مصرفی اضافی توسط موتور تلف خواهد شد. از سوی دیگر برای کنترل دبی خروجی لازم خواهد بود از ادوات مقاومتی نظیر شیر خفه کن استفاده گردد. با استفاده از کنترل کننده های دور

موتور میتوان جریان سیالات در پمپ ها را با اعمال تغییر دور موتور ، کنترل نمود. امروزه این روش بدلیل انعطاف پذیری و صرفه جوئی اقتصادی قابل توجه جایگزین روشهای سنتی متکی بر تنظیم جریان سیال با استفاده از شیرهای تنظیم کننده مکانیکی و دمپرها میشود. در شکل(9) تفاوت دو روش در میزان مصرف انرژی نشان داده شده است.

13- قوانین افینیتی در کاربردهای پمپ و فن

قوانین افینیتی در کاربردهای پمپ و فن های سانتریفوژ پایه نظری صرفه جوئی انرژی با استفاده از درایو هستند. بر طبق این قوانین و در یک پمپ یا فن سانتریفوژ، روابط زیر حاکم است:

$$Q \sim N \quad \text{فلو یا حجم} , Q : \text{سرعت} N :$$

$$H \sim N^2 \quad \text{هد یا فشار} H :$$

$$P \sim N^3 \quad \text{توان ورودی} P :$$

با توجه به شکل(10) فلو/ ولوم بصورت خطی با دور پمپ/فن تغییر میکند. برای مثال اگر دور موتور نصف شود فلو نیز نصف خواهد شد. از طرف دیگر با توجه به منحنی وسط فشار یا هد متناسب با مربع دور تغییر میکند. در این حالت اگر دور موتور نصف شود، فشار یا هد چهار برابر کاهش پیدا کرده و به 25% خواهد رسید. منحنی سمت راست نشان میدهد که اگر دور موتور نصف شود مصرف توان 8 برابر کاهش پیدا کرده و به 12.5% خواهد رسید

شکل(10): نمایش تصویری قوانین افینیتی در کاربردهای پمپ و فن سانتریفوژ به خاطر میسپاریم با استفاده از کنترل کننده های دور موتور و کاهش تنها 15 درصد دور میتوان به میزان 40 درصد در مصرف انرژی صرفه جوئی کرد. حال اجازه بدهید کمی دقیقتر به رفتار یک پمپ توجه کنیم. شکل(11) مشخصات یک سیستم پمپ را نشان میدهد. هد استاتیک عبارتست از اختلاف ارتفاع پمپ و تانک مقصد. بدیهی است که اگر یک پمپ نتواند به این ارتفاع غلبه کند دبی خروجی صفر خواهد بود. مولفه دوم هد اصطکاکی است . که در واقع بیانگر توان مورد نیاز جهت غلبه بر تلفات ناشی از عبور سیال از لوله ها، شیرها، زانوها و دیگر اجزای سیستم لوله کشی میباشد. این تلفات کلا وابسته به سرعت عبور سیال بوده و غیر خطی است. با اضافه کردن دو منحنی، منحنی سیستم بدست میاید.

در شکل(12) منحنی های سیستم و منحنی پمپ باهم نشان داده شده است . نقطه کار یک پمپ محل تلاقی منحنی پمپ و منحنی سیستم می باشد. با توجه به این منحنی ها روشن میشود که میزان فلو در این سیستم 800 لیتر در ثانیه و هد 60 متر میباشد. اگر بخواهیم نقطه کار را تغییر بدهیم لازم خواهد بود چیزی به سیستم اضافه نمائیم.

یک روش متداول در اینجا استفاده از شیر خفه کن است. در شکل(13) تاثیر عملکرد شیر خفه کن در نقطه کار پمپ را مشاهده میکنید. در واقع شیر اصطکاک مسیر سیال را افزایش داده و باعث افت فلو میگردد. با وجود اینکه با حضور شیر فلو به 600 لیتر در ثانیه کاهش پیدا کرده ولی در توان مصرفی سیستم تغییر محسوسی ایجاد نشده است. حال نگاهی دقیقتر به موضوع خواهیم داشت. همانطور که در شکل(14) مشاهده میکنید، برای دستیابی به فلوی مورد نظر از دو روش کنترل فلو با استفاده اشیر و کنترل با استفاده از درایو استفاده شده است . در روش کنترل فلو با شیر میزان توان مصرفی 0.875 درصد و در کنترل فلو با درایو توان مصرفی 0.42 درصد توان نامی میباشد. برای مثال اگر توان نامی پمپ 100 KW باشد. تفاوت توان مصرفی دو روش برابر خواهد بود با:

$$(100\text{KW} \times 0.875) - (100\text{KW} \times 0.42) = 45.5\text{KW}$$

شکل (14) مقایسه توان مصرفی یک سیستم پمپ در دو حالت: الف) کنترل فلو با استفاده از شیر خفه کن (شکل سمت چپ) . ب) کنترل فلو با استفاده از درایو) شکل سمت راست.

شکل (15) - میزان مصرف انرژی در یک پمپ در پنج حالت : با استفاده از شیر برگشتی، با استفاده از شیر خفه کن، با قطع و وصل پمپ، با استفاده از کوپلینگ هیدرولیک، با استفاده از کنترل کننده دور موتور هر چند که در سیستمهایی که هد استاتیک بالا ئی دارند با تغییر دور، راندمان پمپ هم به میزان زیادی تغییر میکند، ولی مزایای دیگر درایو استفاده از آن را بخوبی توجیه میکند. برای مثال میزان فشار هیدرولیک وارد شده به پره های پمپ سانتریفوژ با مجذور سرعت افزایش مییابد. این نیروها به بیرینگهای پمپ اعمال شده و عمر مفید آنها را کاهش خواهد داد. خاطر نشان میشود که عمر بیرینگها بطور معکوس با توان هفتم سرعت متناسب است. از سوی دیگر با کاهش دور نویز و نوسانات سیستم نیز کاهش پیدا میکند.

در شکل (15) میزان مصرف انرژی در یک پمپ در پنج حالت : با استفاده از شیر برگشتی، با استفاده از شیر خفه کن، با قطع و وصل پمپ، با استفاده از کوپلینگ هیدرولیک، و با استفاده از کنترل کننده دور موتور نمایش داده شده است. با توجه به این شکل تاثیر قابل توجه کنترل کننده دور موتور در کاهش انرژی مصرفی، نسبت به روشها، مشاهده میشود. در روش شیر برگشتی متناسب با نیاز مقداری از دبی خروجی پمپ به وروی آن عودت داده میشود. بدیهی است که در این حالت توان مصرفی برای هر دبی خروجی ثابت خواهد بود. امروزه در کشورهای پیشرفته بعنوان یک برخورد اولیه در کاهش مصرف انرژی، مجهز نمودن این نوع فنها و پمپها به درایو میباشد.

نکاتی که باید در طراحی سیستمهای پمپ مورد توجه قرار گیرند عبارتند از: -سیستم را بزرگ انتخاب نکنید. حتی اگر بعدها نیاز به توسعه پیدا کردید. باز مطلوب آن است که بعدا کنار سیستم موجود پمپ بیشتری اضافه کنید -توجه کنید که هزینه های خرید پمپ در مقایسه با هزینه های انرژی آن در طول عمر پمپ ناچیز است. پس پمپهای با راندمان بالا را استفاده کنید. -از درایو برای کنترل فلو استفاده کنید -بجای استفاده از یک پمپ بزرگ از تعدادی پمپ کوچک بطوریکه مجموع آنها ظرفیت مورد نیاز را تامین نماید، استفاده کنید. بدین ترتیب میتوانید در صورت عدم نیاز به ظرفیت اضافی آن را از مدار خارج کنید.

-14 مثال از محاسبات صرفه جویی انرژی در فن برای روشن شدن تاثیر استفاده از درایو در کاربرد فن به مثال زیر توجه میکنیم. نخست اشاره میکنیم به قوانین حاکم بر فن که موسوم به قوانین افینیتی (Affinity Laws) میباشد:

$$\text{Eq. 1: } (N1 / N2) = Q1 / Q2$$

$$\text{Eq. 2: } (N1 / N2)^2 = P1 / P2$$

$$\text{Eq. 3: } (N1 / N2)^2 = T1 / T2$$

$$\text{Eq. 4: } (N1 / N2)^3 = \text{HP1} / \text{HP2}$$

در معادلات فوق N معرف سرعت، Q معرف میزان جریان سیال، T معرف گشتاور، HP معرف توان مصرفی و P معرف فشار است. حال فرض میکنیم یک فن با موتور hp 250 با راندمان 95% موجود است. و سیکل کار آن را در هر هفته بصورت زیر در نظر میگیریم:

ادامه دارد...
