

تعیین درصد بارگذاری و راندمان در حال کار موتورها

"احمد رضا عسگری"

مقدمه

تحقیقات نشان می دهد، سهم قابل توجهی (بیش از ۶۵ درصد) از مصرف انرژی الکتریکی در صنعت به الکتروموتورها اختصاص دارد. نیروی محرکه تجهیزات کاربردی مانند فن ها، پمپ ها و کمپرسورها توسط موتورهای تأمین می گردد. اکثر الکتروموتورهای موجود در صنعت دارای قدرتی بالاتر از قدرت مورد نیاز (Over Size) هستند. این مسئله منجر به تحقیقات زیادی در زمینه افزایش بهره وری موتورها شده است. مواردی نظیر استفاده از موتورهای راندمان بالا، استفاده از درایورهای دور متغیر، تعویض موتورهای فرسوده و ... در این مقوله قرار می گیرد. محاسبه راندمان در حال کار موتورها، یکی از پارامترهای مهم جهت بررسی نحوه عملکرد آنها می باشد. در این مقاله که از مقالات ارائه شده از سازمان وزارت انرژی آمریکا (DOE¹) استخراج شده، به چند روش جهت محاسبه درصد بارگذاری و تخمین راندمان در حال کار موتورها (موتورهای القایی) پرداخته شده است.

➤ محاسبه درصد بارگذاری موتورها

باید توجه داشت، محاسبه دقیق راندمان یک موتور نیاز به شرایط آزمایشگاهی دارد. بدین معنی که باید گشتاور و سرعت شفت یک موتور اندازه گیری شده و سپس با استفاده از رابطه (۱) توان خروجی موتور مذکور محاسبه گردد:

$$P_{out} = \omega \times T \quad \text{رابطه (1)}$$

P_{out} : توان خروجی موتور (Kw)

ω : سرعت شفت موتور (rpm)

T : گشتاور شفت موتور (N.m)

پس از آن توان ورودی نیز اندازه گیری شده و توسط رابطه (۲) راندمان محاسبه می گردد:

¹ Department of Energy

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad \text{رابطه (2)}$$

h: راندمان موتور (%)

P_{out} : توان خروجی موتور (Kw)

P_{in} : توان ورودی موتور (Kw)

ولی در شرایط کاری، عملاً این کار امکان پذیر نبوده و از روش های دیگری به منظور تخمین راندمان در حال کار موتور استفاده می گردد. یکی از این روش ها محاسبه درصد بارگذاری موتور و سپس تخمین راندمان از جداول استاندارد مربوطه می باشد. بنابراین در ابتدا راه های محاسبه درصد بارگذاری موتورها توضیح داده می شود. در این راستا می توان از سه روش زیر استفاده نمود.

۱- اندازه گیری توان ورودی

۲- اندازه گیری جریان و ولتاژ موتور

۳- اندازه گیری لغزش

لازم به ذکر است که در بین موارد ذکر شده، روش اول یعنی اندازه گیری توان ورودی دقیق تر از دو روش دیگر بوده و پس از آن به ترتیب روش های دوم و سوم قرار می گیرند. در ادامه به توضیح روش های مذکور پرداخته می شود.

۱- اندازه گیری توان ورودی

در صورتی که امکان اندازه گیری توان ورودی به موتور وجود داشته باشد، از این روش استفاده می گردد. در این روش، نسبت توان ورودی اندازه گیری شده به توان ورودی نامی، درصد بارگذاری موتور را نشان

می دهد. (رابطه ۳)

$$Load = \frac{P_m}{P_{in}} \times 100 \quad \text{رابطه (3)}$$

Load: میزان بارگذاری (%)

P_m : توان ورودی اندازه گیری شده (Kw)

P_{in} : توان ورودی نامی (Kw)

به دلیل اینکه توان نوشته شده روی پلاک موتورها، توان خروجی (P_{out}) می باشد، توان ورودی نامی (P_{in}) را می توان به دو صورت زیر محاسبه نمود:

✓ اگر راندمان نامی بر روی پلاک موتور موجود باشد، از رابطه (۴) استفاده می شود:

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} \times 100 \quad \text{رابطه (4)}$$

P_{in} : توان ورودی نامی موتور (Kw)

P_{out} : توان خروجی، پلاک موتور (Kw)

η : راندمان نامی (%)

✓ اگر راندمان بر روی پلاک موتور موجود نباشد، از روابط (۵) و (۶) جهت محاسبه توان نامی ورودی استفاده می گردد:

$$P_{in} = V_n \times I_n \times \cos \varphi \quad \text{موتورهای تکفاز} \quad \text{رابطه (5)}$$

$$P_{in} = \sqrt{3} \times V_n \times I_n \times \cos \varphi \quad \text{موتورهای سه فاز} \quad \text{رابطه (6)}$$

V_n : ولتاژ نامی (V)

I_n : جریان نامی (A)

$\cos \varphi$: ضریب توان نامی

مثال ۱: بر روی پلاک یک موتور القایی سه فاز مشخصات زیر نوشته شده است:

55 kw , 400 v , 100 A, 0.86

توان ورودی این موتور در حال کارکرد معمول 36.5 kw اندازه گیری شده است. درصد بارگذاری این موتور به صورت زیر محاسبه می شود:

$$P_{in} = \sqrt{3} \times 400^v \times 100^A \times 0.86 = 59.6 \text{ kw}$$

$$Load = \frac{34.5}{59.6} = 57.9 \%$$

بنابراین، این موتور در حدود ۵۸ درصد نامی در حال کار می باشد.

۲- اندازه گیری جریان و ولتاژ موتور

در صورتی که تنها اندازه گیری جریان و ولتاژ موتور امکان پذیر باشد، می توان از این روش استفاده نمود. نسبت جریان مصرفی یک موتور با مقدار بار آن برای بارهای بالاتر از ۵۰ درصد تقریباً خطی است، ولی در بارهای کمتر از ۵۰ درصد به دلیل زیاد بودن جریان مغناطیس کنندگی و کاهش ضریب توان، این نسبت دیگر خطی نخواهد بود. بنابراین در بارهای کمتر از ۵۰ درصد، روش فوق جهت محاسبه بارگذاری موتور مناسب نمی باشد.

رابطه (۷) روش محاسبه درصد بارگذاری موتور را با استفاده از اندازه گیری جریان و ولتاژ ورودی نشان می دهد.

$$Load = \frac{I_m}{I_n} \times \frac{V_m}{V_n} \times 100 \quad \text{رابطه (7)}$$

Load: میزان بارگذاری (%)

I_m : جریان اندازه گیری شده (A)

I_n : جریان نامی (A)

V_m : ولتاژ خط اندازه گیری شده (V)

V_n : ولتاژ نامی خط (V)

مثال ۲: نتایج اندازه گیری بر روی موتور مفروض در مثال ۱ به صورت زیر می باشد:

$$I_m = 70 \text{ A}, V_m = 390 \text{ V}$$

درصد بارگذاری این موتور به صورت زیر محاسبه می شود:

$$Load = \frac{70}{100} \times \frac{390}{400} \times 100 = 68.3\%$$

بنابراین درصد بارگذاری موتور مذکور در حدود ۶۸ درصد است.

۳- روش لغزش

طبق تعریف، سرعت سنکرون یک موتور (یا سرعت میدان موتور) متناسب با فرکانس برق شبکه و تعداد قطب ها می باشد و توسط رابطه (۸) به دست می آید.

$$N_s = \frac{120 f}{P} \quad \text{رابطه (8)}$$

N_s : سرعت سنکرون (rpm)

f : فرکانس برق شبکه (Hz)

P : تعداد قطب ها

برای مثال در فرکانس برق ۵۰ هرتز، سرعت سنکرون یک موتور ۲ قطبی ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و یک موتور ۴ قطبی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه می باشد.

سرعت واقعی هر موتور (سرعت شفت) کمتر از سرعت سنکرون بوده و اختلاف بین این دو سرعت تحت عنوان لغزش شناخته می شود.

یکی از روش های محاسبه بارگذاری موتورها، اندازه گیری لغزش می باشد. از این روش زمانی استفاده می شود که فقط اندازه گیری سرعت شفت موتور امکان پذیر است.

در این روش، ابتدا توسط یک دورسنج، دور موتور اندازه گیری شده و سپس توسط رابطه (۹) بارگذاری آن محاسبه می گردد:

$$Load = \frac{S_m}{S_n} = \frac{N_s - N_m}{N_s - N_n} \quad \text{رابطه (9)}$$

$Load$: میزان بارگذاری (%)

S_m : لغزش در حال کار موتور (rpm)

S_n : لغزش نامی موتور (rpm)

N_s : سرعت سنکرون (rpm)

N_m : سرعت اندازه گیری شده (rpm)

N_n : سرعت نامی موتور - پلاک موتور (rpm)

مثال ۳: یک موتور سه فاز ۴ قطب با فرکانس برق ۵۰ هرتز در حال کار است. سرعت نوشته شده روی پلاک موتور ۱۴۶۰ دور بر دقیقه می باشد. اندازه گیری سرعت این موتور در حالت کارکرد عادی ۱۴۸۰ دور بر دقیقه را نشان می دهد. درصد بارگذاری به صورت زیر به دست می آید:

$$N_s = \frac{120f}{p} = 1500 \text{ rpm}$$

$$Load = \frac{1500 - 1480}{1500 - 1460} = 50\%$$

بنابراین، این موتور در ۵۰ درصد بار نامی در حال کار است.

روش لغزش به دلیل سادگی در اندازه گیری، پرترفدار می باشد، ولی به هر حال دقت این روش محدود است. از مهمترین دلایل این محدودیت اینست که، استاندارد NEMA^۱ برای سازندگان موتورها، جهت گزارش سرعت نامی (درج شده بر روی پلاک) ۲۰ درصد تفرانس را مجاز اعلام نموده که این موضوع باعث شده، سازندگان مذکور سرعت واقعی موتور را تا ۵ دور بر دقیقه گرد شده گزارش نمایند. اگرچه ۵ دور بر دقیقه نسبت به سرعت نامی موتور ناچیز بوده، ولی در محاسبات بارگذاری به روش فوق می تواند خطای قابل توجهی را وارد نماید.

نکته قابل ذکر دیگر در مورد روش لغزش اینست که، به دلیل اینکه لغزش با مربع ولتاژ واقعی به ولتاژ نامی، نسبت عکس دارد، می توان یک ضریب تصحیح ولتاژ نیز به رابطه (۹) اضافه نمود که در این صورت، محاسبه درصد بارگذاری به صورت رابطه (۱۰) خواهد شد:

$$Load = \frac{N_s - N_m}{(N_s - N_n) \times \left(\frac{V_n}{V_m}\right)^2} \times 100 \quad \text{رابطه (10)}$$

V_m : ولتاژ خط اندازه گیری شده (V)

V_n : ولتاژ نامی خط (V)

اگر چه رابطه (۱۰) به نظر ساده و کاربردی می رسد، ولی دقت آن زیاد مطلوب نیست. به طور کلی روش لغزش در محاسبه درصد بارگذاری موتورها پیشنهاد نمی شود.

تخمین راندمان موتورها با استفاده از درصد بارگذاری

در قسمت قبل، سه روش جهت محاسبه درصد بارگذاری موتورها ارائه گردید. در این قسمت به چگونگی تخمین راندمان پرداخته می شود.

² National Electrical Manufacturers Association

جهت تخمین راندمان یک موتور، در ابتدا باید درصد بارگذاری آن با استفاده از یکی از روش های گفته شده محاسبه گردد. پس از آن به دو طریق می توان عمل کرد:

۱- مراجعه به مدارک طراحی موتور مذکور یا تماس با سازنده آن و استفاده از مشخصات موتور. در بعضی از مدارک، راندمان را در چندین بار (مثلاً ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد بار نامی) مشخص می نمایند. با استفاده از اطلاعات موجود و در صورت نیاز با میان یابی می توان راندمان موتور را در شرایط کارکردش تخمین زد.

۲- در صورتی که دسترسی به مدارک موتور و سازنده ممکن نبوده و یا اطلاعات مذکور کافی نباشد، می توان از جداول استاندارد که به همین منظور وجود دارد، استفاده نمود. در استانداردهایی مانند NEMA و IEC می توان به چنین اطلاعاتی دست پیدا کرد.

جداول مذکور، راندمان موتورها را در ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد بار نامی برای سائزهای مختلف و دور سنکرون های موجود (۷۵۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۳۰۰۰ دور بر دقیقه برای فرکانس ۵۰ هرتز و ۹۰۰، ۱۲۰۰، ۱۸۰۰ و ۳۶۰۰ دور بر دقیقه برای فرکانس ۶۰ هرتز) ارائه می دهد. با

استفاده از این جداول و در صورت نیاز با میان یابی می توان راندمان موتورها را تخمین زد. برای نمونه یکی از جداول مذکور (منتشر شده مطابق با استاندارد NEMA) در زیر آورده شده است. لازم به ذکر است که جدول مذکور جهت موتورهای ۶۰ هرتز می باشد.

Efficiencies for 1,800 RPM, Old Standard Efficiency Motors								
Motor Size	Load Level In Percent							
	ODP ¹				TEFC ²			
	100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
10	86.1	87.4	86.9	81.8	85.7	86.7	85.4	77.4
15	87.8	88.8	88.3	82.0	86.6	87.5	86.0	74.9
20	88.3	89.4	88.7	83.3	88.5	89.3	88.5	82.9
25	88.9	90.0	89.8	86.6	89.3	89.9	88.8	82.1
30	88.9	90.6	90.5	87.4	89.6	90.2	89.2	83.6
40	90.0	90.3	89.4	85.7	90.2	90.4	89.2	81.6
50	90.7	91.2	90.4	87.4	91.3	91.6	90.9	84.1
60	91.3	91.7	90.8	86.8	91.8	91.9	90.8	85.2
75	91.9	92.3	91.6	87.7	91.7	92.0	90.9	85.1
100	92.1	92.7	92.2	89.2	92.3	92.2	91.2	86.2
125	92.2	92.8	92.2	88.2	92.2	91.6	90.5	84.0
150	92.8	93.1	92.4	88.6	93.0	92.8	91.5	86.3
200	93.0	93.4	93.0	90.3	93.5	93.3	92.0	86.3
250	94.4	94.6	93.8	92.0	94.2	94.1	93.0	88.8
300	94.6	94.7	93.8	92.8	94.4	94.2	93.1	89.9

1- Open Drip Proof

2- Totally Enclosed, Fan Cooled

محاسبه راندمان با استفاده از نرم افزار

مطابق آنچه گفته شد، محاسبه دقیق راندمان در حال کار موتورها بسیار مشکل و شاید در عمل ناممکن باشد. بنابراین جهت محاسبه راندمان موتورها در شرایط کاری، از روش های تخمینی استفاده می گردد. در این مقاله به یکی از این روش ها اشاره گردید. روش های دیگری نیز وجود دارد که یا نیاز به دستگاه های خاص و دقیق دارد و یا اینکه بسیار پیچیده می باشند.

لازم به ذکر است که نرم افزارهایی نیز به همین منظور طراحی شده اند. یکی از این نرم افزارها Motor Master می باشد. این نرم افزار دارای یک بانک اطلاعاتی مشخصات موتورها از سازنده های مختلف و با سایزهای گوناگون است. با وارد کردن اطلاعات اندازه گیری در این نرم افزار، راندمان در حال کار موتور به صورت تخمینی مشخص می گردد. همچنین میزان صرفه جویی انرژی را در صورت جایگزینی موتورهای موجود با موتورهای پربازده نیز می توان با این نرم افزار محاسبه نمود. نمایی از نرم افزار مذکور در شکل زیر آورده شده است.

Motor Savings Analysis

Scenario: **New** Savings Best Available Print Help Close

Motor Characteristics

EFF3 Standard Efficiency Motor

Description: EFF3 - Standard Efficiency

Size (kW) / Speed (RPM) (Poles): 45 / 1500 (4)

Degree of protection / Voltage (Volts): IP55 / 380

Load (%): 75.0

Efficiency (%): 92.0

Full load RPM: 0 ☐ Centrifugal load

Costs/Use

Premium Efficiency Motor

Description: EFF1 - High Efficiency

Size (kW) / Speed (RPM) (Poles): 45 / 1500 (4)

Degree of protection / Voltage (Volts): IP55 / 380

Load (%): 75.0

Efficiency (%): 94.4

Full load RPM: 0

Savings

EFF3 Standard Efficiency Motor	Premium Efficiency Motor
Differential cost (\$):	2,314
Energy use (kWh/yr):	293,478
Energy cost (\$/yr):	188,119,568
Demand charge (\$/yr):	0

Energy Savings

Energy (kWh/yr): 7,447

Demand (kW): 0.9

Energy savings (\$/yr): 4,773,365

Demand savings (\$/yr): 0

Greenhouse Gas Emissions Reduction

State: <none> tonnes CO2/yr: 0.0

Total savings (\$/yr): 4,773,365

Simple payback (yrs): 0.00

مراجع:

- [1] Determining Electric Motor Load and Efficiency, U.S. Department of Energy
- [2] Premium Efficiency Motor Selection and Application Guide, U.S. Department of Energy
- [3] Energy Management for Motor-Driven System, Gilbert A. McCoy & John G. Doglass, Washington State University
- [4] Assessment of Methods for Estimating Motor Efficiency and Load, OAK Ridge National Lab., 1996