

اثرات نامتعادلی ولتاژ بر عملکرد الکتروموتورهای صنعتی

مقدمه

موتورهای الکتریکی بیش از $\frac{2}{3}$ انرژی مصرفی صنایع را به خود اختصاص می‌دهند. به عبارت دیگر افزایش در راندمان کلی سیستم توان، دلیل رشد بکارگیری از وسایلی مانند موتورهای راندمان بالا، کنترل کننده های دور موتور و خازن های موازی به منظور اصلاح ضریب توان و کاهش تلفات می‌باشد. لذا بکارگیری این تجهیزات باعث افزایش سطح هارمونیک در سیستم توزیع برق (توان) می‌شود.

به همین جهت موضوع مقاله حاضر مطالعه و بررسی اثرات کیفیت توان در راندمان و پایداری موتورهای القایی که بسیار حائز اهمیت است، می‌باشد.

در این مقاله بکارگیری صحیح موتورهای القایی سه فاز در هنگامی که با یک منبع تغذیه نامتعادل و ولتاژ هارمونیک تغذیه می‌شود و اثرات آن بر روی راندمان موتور و دیگر مشخصات الکتروموتور پرداخته می‌شود. از آنجایی که ولتاژ باکیفیت توان ضعیف، اثرات نامطلوبی بر روی عملکرد الکتروموتور داشته و باعث افزایش تلفات، دما، کاهش توان نامی، راندمان و نویز مغناطیسی و افزایش جریان بلبرینگ‌ها و کاهش پایداری آن می‌گردد، لذا هدف از ارائه این راهکارها جلوگیری و یا به حداقل رساندن اثرات اخیرالذکر

می‌باشد.



۱- اثر ولتاژ سه فاز نامتعادل:

عدم برابری ولتاژ سه فاز تغذیه به الکتروموتور از نظر دامنه و فاز، باعث تولید جریان نامتعادل در سیم‌پیچی استاتور خواهد شد. لذا ولتاژهای نامتعادل شده بر روی موتورهای القایی باعث تولید ولتاژهایی با مولفه منفی می‌گردد و آن هم باعث تولید یک میدان دوار که جهت آن مخالف جهت میدان اصلی الکتروموتور می‌باشد، می‌گردد.

این ولتاژها با مولفه منفی در فاصله هوایی تولید یک شار چرخشی که جهت آن مخالف جهت حرکت روند می‌باشد حرکت می‌کند که در پی آن جریان بسیار افزایش می‌یابد.

اساساً نوع کارکرد موتورهای القایی در مقابل مولفه مثبت ولتاژ، مشابه رفتار آن در مقابل ولتاژ نرمال (نامی) می‌باشد. جریان مولفه منفی، بهر حال مخالف جریان میدان اصلی می‌باشد. همچنین اگر لغزش روتور در حضور مولفه مثبت ولتاژ برابر S باشد در آن صورت لغزش در برابر مولفه منفی ولتاژ برابر $2-S$ می‌باشد. در این حالت یک موتور به عنوان دو الکتروموتور مستقل عمل می‌کند که یکی چرخش با لغزش S و با ولتاژ ترمینال معادل ولتاژ مولفه مثبت و دیگری چرخش با لغزش $(2-S)$ و با ولتاژ ترمینال معادل ولتاژ مولفه منفی.

مدل فوق مدل ساده‌ای است برای درک آسان از شار مولفه منفی که با سرعتی معادل 2 برابر سرعت سنکرون در روتور ظاهر می‌شود که پس از آن تلفات در هسته روتور افزایش می‌یابد.

در مدار معادل الکتروموتور می‌توان نشان داد که تحت این شرایط چگونه گشتاور موتور کاهش می‌یابد.

الف - تعریف ولتاژ نامتعادل:

تعریفی که استاندارد IEC 60034-26 از نامتعادلی ولتاژ ارائه کرده است، عبارت است از نسبت مولفه منفی به مولفه مثبت ولتاژ که به صورت معادله شماره (۱) بیان می‌شود:

$$\text{درصد نامتعادلی ولتاژ} = \frac{V_{ab2}}{V_{ab1}} \times 100 \quad (1)$$

برای سه نوع ولتاژ نامتعادل V_{ab} ، V_{bc} ، V_{cd} ، مولفه منفی و مثبت ولتاژ از رابطه زیر بدست می آید.

$$V_{ab1} = \frac{V_{ab} + a \times V_{bc} + a^2 \times V_{ca}}{3}$$

$$V_{ab2} = \frac{V_{ab} + a^2 \times V_{bc} + a \times V_{ca}}{3}$$

که در این رابطه $a^2 = 0.5 - io.866$ ، $a^2 = 0.5 + io.866$ می باشد.

همچنین تعریفی که استاندارد NEMA از نامتعادلی ولتاژ ارائه داده بر اساس معادله شماره (۲)

می باشد:

$$(۲) \quad 100 \times \text{اختلاف ولتاژ ماکزیمم از ولتاژ متوسط} = \text{درصد نامتعادلی ولتاژ}$$

ولتاژ متوسط

تعریفی که استاندارد NEMA از نامتعادلی ولتاژ ارائه کرده است، از اختلاف فاز بین ولتاژها

اجتناب کرده و صرفاً دامنه ولتاژها را مد نظر قرار داده است. بهر حال هر یک از تعاریف فوق نتایج مختلفی

از نامتعادلی ولتاژ را بدست می دهد.

به عنوان مثال اگر ولتاژ ۳ فاز نامتعادل شده خط به خط به صورت زیر باشد:

$$V_{ab} = 450 < 0^\circ$$

$$V_{ab} = 363.6 < -121.44^\circ$$

$$V_{ca} = 405 < 130^\circ$$

با استفاده از معادله شماره (۱) مؤلف های مثبت و منفی ولتاژ به شرح زیر خواهد بود:

$$V_{ab1} = 404.62522 < 2.89^\circ \text{ : مؤلفه مثبت}$$

$$V_{ab2} = 50.217 < -2398^\circ \text{ : مؤلفه منفی}$$

سپس با استفاده از تعریف استاندارد IEC از نامتعادلی ولتاژ طبق تعریف معادله شماره (۱) خواهیم

داشت:

$$\text{مولفه منفی ولتاژ} = \frac{50.217}{404.625} \times 100 = 12.41\%$$

مولفه مثبت ولتاژ

اما بر اساس تعریف استاندارد NEMA خواهیم داشت:

$$\text{ولت متوسط ولتاژ} = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3} = 406.2$$

$$\text{ولت } 450 - 406.2 = 43.8$$

$$\text{ولت } 363.6 - 406.2 = -42.6$$

$$\text{ولت } 405 - 406.2 = -1.2$$

سپس درصد نامتعادلی با توجه به اینکه حداکثر اختلاف ولتاژ معادل ۴۳/۸ می‌باشد، برابر است با :

$$\text{درصد نامتعادلی} = \frac{43.8}{4.6.2} \times 100 = 10.78\%$$

بدین ترتیب مشاهده می شود که استفاده از ۲ روش مختلف، منجر به ۲ پاسخ و نتیجه ی متفاوت

خواهد شد.

اثرات نامتعادلی ولتاژ بر روی توان نامی الکتروموتور

درصد کوچکی از نامتعادلی ولتاژ، باعث ایجاد درصد بسیار زیادی از نامتعادلی جریان می شود. از

این رو در این حالت افزایش گرمای موتور در یک بار مشخص، خیلی بیشتر از شرایطی است که موتور تحت

ولتاژ متعادل کار کند.

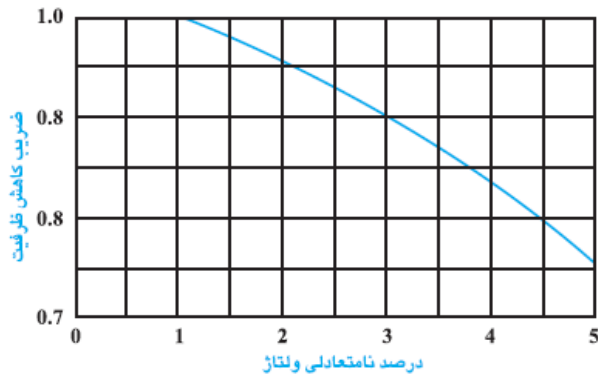
اگر یک موتور تحت ولتاژ نامتعادل کار کند، ظرفیت الکتروموتور کاهش یافته و تحت این شرایط

می‌بایستی جهت تعیین ظرفیت الکتروموتور، توان نامی موتور در ضریبی که به آن ضریب کاهش

(Derating factor) گفته می‌شود، ضرب شود. رابطه بین درصد نامتعادلی ولتاژ و کاهش ظرفیت

الکتروموتور در نمودار شماره (۱) نشان داده

شده است.



نمودار شماره (۱) - نمودار درصد نامتعادلی ولتاژ و ضریب کاهش ظرفیت

در این نمودار مشاهده می‌شود که اگر درصد نامتعادلی ۱ درصد باشد، مشکلی در ظرفیت الکتروموتور ایجاد نمی‌شود و چنانچه نامتعادلی ۲ درصد باشد، ضریب کاهش برابر 0.96 خواهد بود. اما در صورتی که نامتعادلی معادل ۴ درصد باشد، ضریب کاهش برابر 0.71 خواهد بود، یعنی به عبارتی الکتروموتور با ظرفیت ۷۶ درصد ظرفیت نامی خود کار می‌کند و بر اساس محدوده مشخص شده توسط استاندارد IEEE، بکارگیری الکتروموتورها با درصد نامتعادلی ولتاژ بیش از ۵ درصد پیشنهاد نمی‌شود، چرا که در خارج از محدوده استاندارد الکتروموتور با ۵۰ درصد ظرفیت نامی خود کار می‌کند.

اثر نامتعادلی ولتاژ بر روی دیگر مشخصات عملکردی الکتروموتور

نامتعادلی ولتاژ باعث می‌شود که امکان بوجود آمدن نامتعادلی جریان، در حدود ۶ تا ۱۰ برابر افزایش پیدا کند. در بحث قبلی اثرات منفی نامتعادلی ولتاژ بر روی عملکرد موتور مورد بررسی قرار گرفت.

- در حالت نامتعادلی ولتاژ بیش از ۳ یا ۵ درصد، گشتاور شکست (Breakdown torque) و گشتار ترمزی (Loked-rotor) الکتروموتور کاهش می‌یابد. چنانچه درصد ولتاژ نامتعادلی افزایش یابد، ممکن است موتور قادر به راه اندازی نباشد.
- در حالت افزایش نامتعادلی ولتاژ، سرعت موتور در بار کامل به حداقل میزان خود کاهش می‌یابد.
- در حالت ترمز الکتروموتور، جریان نیز به همان میزانی که ولتاژ دچار نامتعادلی می‌شود، دچار عدم تعادل نیز می‌شود. اما توان کل (KVA) فقط به میزان بسیار ناچیزی افزایش می‌یابد.

اعوجاج شکل موج ولتاژ

وقتی که شکل موج ولتاژ تغذیه الکتروموتورها از حالت سینوسی خارج شود، در این شرایط شکستن موج ولتاژ دارای مولفه های هارمونیک خواهد بود. این مولفه های هارمونیک به همراه ولتاژ تغذیه باعث ایجاد شار هارمونیک در موتور می‌شود.

اصولاً شار هارمونیک مشکلی در گشتاور موتور ایجاد نمی‌کند، اما بدلیل اینکه فرکانس گردش آن با فرکانس سرعت الکترون متفاوت است، جریانی با فرکانس بسیار بالا در الکتروموتور نفوذ می‌کند که این موضوع (هارمونیک های ولتاژ) باعث ایجاد تلفات، افزایش دما، کاهش توان نامی، کاهش راندمان و کاهش عمر بلبرینگ های (bearing) الکتروموتور می‌شود.

به عبارت دیگر، جریان هادی هارمونیک هنگامی در الکتروموتور نفوذ می‌کند که ولتاژ تغذیه الکتروموتور، دارای مولفه های هارمونیک ولتاژ باشند. سرعت چرخش میدان دوران (سرعت

$$\text{سنكرون) در استاتور موتور القایی برابر است با } N_s = \frac{120f}{p}$$

p نشان دهنده تعداد قطب و f_1 فرکانس نامی می‌باشد. در لغزش s ، سرعت روتور برابر خواهد بود

$$\text{با } (1-s) \text{ و } N = \frac{120f_1}{P} \text{ و فرکانس جریان روتور } Sf_1 \text{ خواهد بود.}$$

- در حالت نامتعادلی ولتاژ، جریان قفل روتور (**locked-rotor**) به اندازه ولتاژ نامتعادل، دچار عدم تعادل می‌شود، در صورتی که توان ظاهری (**KVA**) موتور در حالت قفل روتور به میزان جزئی افزایش می‌یابد.
- جریان نامتعادلی الکتروموتور در شرایط نامتعادل ولتاژ به حدود ۶ تا ۱۰ برابر درصد نامتعادل ولتاژ می‌رسد.

تعریف ضریب هارمونیک ولتاژ (HVF)

اثر هارمونیک‌ها در کاهش ظرفیت توان نامی الکتروموتورها را ضریب هارمونیک ولتاژ می‌گویند.

ضریب هارمونیک ولتاژ بر اساس رابطه شماره (۳) بدست می‌آید:

$$HVF = \sqrt{\sum_{n=5}^{n=8} \frac{(Vn)^2}{n}} \quad (3)$$

که در این رابطه ،

n : شماره هارمونیک مرتبه **n** ام

Vn : دامنه ولتاژ هارمونیکی در فرکانس **n** ام

برای مثال اگر مولفه های ولتاژ هارمونیکی در ولتاژ خط ، دارای دامنه‌های **0.1** ، **0.07** ، **0.045** و **0.036** در هارمونیک پنجم، هفتم و یازدهم باشد، در این صورت ضریب هارمونیکی ولتاژ بر اساس رابطه (۳) عبارت خواهد بود.

تعریفی که استاندارد **NEMA** از ضریب هارمونیکی ولتاژ ارائه کرده است دقیقاً همان تعریفی است که استاندارد **IEC** ارائه کرده است.

اگر ولتاژ تغذیه در موتورهای القایی دارای ضریب هارمونیکی ولتاژ (HVF) برابر ۳ درصد باشد، مشکلی برای توان نامی الکتروموتور پیش نمی آید و اگر ضریب هارمونیکی ولتاژ ۵ درصد باشد، ضریب کاهش (DF) مطابق منحنی شماره (۲) معادل 0.97 خواهد بود. زمانی که ضریب هارمونیکی ولتاژ ۱۱ درصد باشد، ضریب کاهش ظرفیت الکتروموتور برابر 0.75 می باشد که در این صورت توان نامی الکتروموتور ۲۵ درصد کاهش می یابد.

لازم به ذکر است که عملکرد موتورهای القایی با ضریب هارمونیکی ولتاژ، (HVF) بیش از ۵ درصد پیش بینی شود.

اثر نامتعادل ولتاژ روی افزایش دما و توان نامی الکتروموتور

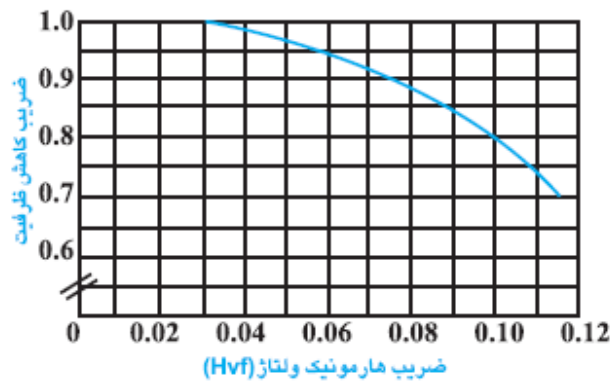
همانطور که قبل از این نیز بیان شد، هارمونیک ها در افزایش تلفات موتور نقش قابل ملاحظه ای دارند بطوریکه تلفات موتور شامل تلفات سیم پیچی و اصطکاک، تلفات مسی استاتور، تلفات هسته، تلفات مسی روتور و تلفات چرخشی در هسته و هادی های روتور را افزایش می دهد.

با افزایش هارمونیک ها راکتانس نشستی کاهش و مقاومت روتور افزایش می یابد. مقاومت روتور در استاتور و روتور، ممکن است به ۴ تا ۶ برابر مقدار مقاومت dc افزایش یابد. تلفات مسی روتور علاوه بر اینکه با توان دوم جریان هارمونیکی افزایش پیدا می کند (RI^2)، افزایش تلفات ناشی از اثر پوستی (skin effect) در فرکانس های بالا را نیز در پی خواهد داشت.

اثر مستقیم هارمونیک ها در الکتروموتور، باعث افزایش تلفات در سیم پیچی استاتور تلفات چرخشی می گردد. افزایش این تلفات همچنین منجر به افزایش دمای موتور و در نتیجه کاهش توان نامی الکتروموتور خواهد شد.

جهت اجتناب از افزایش گرما در الکتروموتور، توان نامی الکتروموتور باید تقلیل یافته تا الکتروموتور قادر به کارکردن بدون افزایش دما در کلاس حرارتی تعریف شده باشد.

مطابق بخش سی ام استاندارد NEMA M 61.1993 کاهش ظرفیت الکتروموتور در اثر ضریب هارمونیکی ولتاژ (HVF) مطابق نمودار شماره (۲) را ضریب کاهش ظرفیت (Derating factor) می نامند.



نمودار ۲ - ضریب هارمونیکی ولتاژ و ضریب کاهش

اثر ضریب هارمونیکی ولتاژ بر راندمان الکتروموتورها

هنگامی که یک موتور القایی تحت تغذیه یک ولتاژ هارمونیکی قرار می گیرد، راندمان آن به دلیل افزایش تلفات ایجاد شده توسط جریان های هارمونیکی در سیم پیچی الکتروموتور کاهش می یابد. در این حالت میزان راندمان کاهش یافته الکتروموتور پس از ضریب کاهش ظرفیت (DF)، مطابق رابطه شماره (۴) خواهد بود.

$$\eta_c = \frac{DF^2}{\frac{1}{\eta} + DF^2 - 1} \quad (۴)$$

که در این رابطه: η راندمان الکتروموتور در شرایط تغذیه سینوسی و η_c راندمان الکتروموتور در شرایط تغذیه با ولتاژ هارمونیکی خواهد بود.

اثر هارمونیک های ولتاژ بر روی بلبرینگ های (Bearing) الکتروموتورها در اثر جریان بلبرینگ

حداقل سه مشخصه برای تولید جریان هریک از بلبرینگ های یک الکتروموتور وجود دارد و امکان وقوع هر یک از این مشخصه ها در هر زمان وجود دارد که البته بستگی به مشخصات الکتریکی بلبرینگ ها دارد.

این مشخصه ها عبارتند از:

- جریان بلبرینگ به دلیل تخلیه خازن در فاصله هوایی الکتروموتور

- جریان بلبرینگ به جهت تغییرات ولتاژ بر حسب زمان $\frac{dv}{dt}$

- جریان بلبرینگ به دلیل شار مغناطیسی حاصل از مولفه های صفر هارمونیک جریان

دو مکانیسم اول هنگامی به وقوع می پیوندند که یک اینورتر با مدولاسیون (PWM) جهت کنترل

سرعت به الکتروموتور متصل باشد. در این مقاله فقط به مکانیسم سوم پرداخته می شود.

جریان هارمونیک مولفه صفر عبارت است از: $\eta = 0,3,6,9,\dots$

همه این هارمونیک ها دارای مشخصات یکسانی بوده و از ترمینال ورودی الکتروموتور سرچشمه می گیرند و همواره با یکدیگر هم فاز هستند.

لذا جمع برداری این جریان های سه فاز صفر نبوده و برابر است با مجموع جریان مولفه صفر.

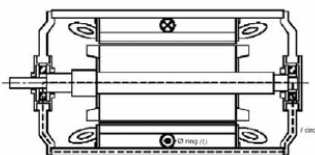
جریان مؤلفه صفر، یک شار محصور در محور الکتروموتور تولید می کند که نتیجتاً موجب شکل گیری

یک نیروی محرکه معکوس (e.f.m) در محور موتور می گردد. شکل شماره (۳)

efm تولید شده توسط جریان های هارمونیک، معمولاً خیلی کوچک (در حد میلی ولت)

می باشد و در نتیجه باعث عبور یک جریان دوار (Circulating current) در سراسر بلبرینگ می گردد.

hem.381



شکل (۳) مسیر جریان دوار بلبرینگ به دلیل شار ناشی تولید شده توسط جریان هارمونیک مولد

