

آزمایشگاه ماشین‌های الکتریکی ۱

آزمایش شماره‌ی ۲-۳

گزارش کار

راه‌اندازی ماشین آسنکرون

استاد دریاباد

نگارش:

اشکان نیوشا

۲۷ مهر ۱۳۸۷

به نام خدا

تئوری آزمایش

هدف ما در این آزمایش، بررسی روش‌های گوناگون راه‌اندازی یک موتور القایی است. چرا که می‌دانیم اگر موتورهای الکتریکی را به یکباره به ولتاژ نامی وصل کنیم، در آغاز، جریان بسیار زیادی از شبکه می‌کشند و این جریان برای موتورهای بزرگ‌تر، بسیار بیشتر از جریان نامی آن‌ها خواهد بود.

بر اساس قانون اهم برای روتور یک موتور القایی داریم $I_r = \frac{V_r}{Z_r} = \frac{V_r}{\sqrt{R_r^2 + X_r^2}}$ همچنین می‌دانیم که در موتورهای آسنکرون $V_r = sE_r$ و $X_r = sX_{rs}$ بنابراین،

$I_r = \frac{V_r}{Z_r} = \frac{sE_r}{\sqrt{R_r^2 + (sX_{rs})^2}}$ بیشینه‌ی این رابطه به ازای $s = 1$ به دست می‌آید؛ یعنی، جریان

هنگامی بیشینه است که لغزش بیشینه باشد. چراکه می‌توان رابطه‌ی پیش را به صورت

$$I_r = \frac{sE_r}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X_{rs}^2}}$$

کوچکتر خواهد بود و برعکس؛ هرچه s بزرگتر باشد، مخرج کسر کوچکتر و کل آن بزرگتر خواهد بود. برای به دست آوردن رابطه‌ی دقیق جریان-ضریب لغزش، کافی است از رابطه‌ی بالا مشتق بگیریم. هنگام خاموشی موتور، سرعت استاتور و روتور هر دو صفر است و هنگام راه‌اندازی سرعت استاتور برابر سرعت نامی شده، ولی هنوز روتور ساکن است؛ پس در هنگام راه‌اندازی

لغزش برابر یک است. پس جریان بیشینه است و مقدار آن در روتور برابر $I_{rst} = \frac{E_r}{\sqrt{R_r^2 + X_{rs}^2}}$ است.

برای کاهش جریان، بر پایه‌ی قانون اهم، یا باید ولتاژ در لحظه‌ی راه‌اندازی کمتر از ولتاژ نامی باشد و یا امپدانس بیشتر از امپدانس حالت دائم باشد. با توجه به این نکته، پنج روش راه‌اندازی برای موتور آسنکرون القایی وجود دارد. استفاده از هر یک از روش‌های زیر، بستگی به ۱- اندازه یا توان ماشین؛ ۲- اندازه یا توان شبکه؛ ۳- اندازه‌ی بار در هنگام راه‌اندازی دارد. روش نخست راه‌اندازی مستقیم است.

در روش دوم، موتور از طریق یک اتوترانسفورماتور تغذیه می‌شود. پیش از راه‌اندازی، ولتاژ موتور صفر است؛ به تدریج، ولتاژ را با اتوترانسفورماتور افزوده تا به نزدیکی ولتاژ نامی (با توجه به گونه‌ی اتصال λ یا Δ) برسد؛ سپس، اتوترانس را از مدار خارج می‌کنیم. روشن است که این روش بیشتر برای موتورهایی با توان پایین به کار می‌رود؛ چراکه اتوترانس‌ها (تک‌سیم‌پیچه هستند و ولتاژ پایینی دارند؛ پس)، در توان‌های پایین ساخته می‌شوند. این روش سبب کاهش گشتاور راه‌اندازی می‌شود؛ پس برای راه‌اندازی زیر بار مناسب نیست؛ زیرا که برای گشتاور یک ماشین القایی داریم $T = k_1 \Phi I \cos f_r = k V_r I_r \cos f_r = k V_r \frac{V_r}{Z_r} \cos f_r = k V_r^2 \frac{R_r}{R_r^2 + X_r^2}$ و گشتاور راه‌اندازی، چون V_r به تدریج زیاد می‌شود و مقدار آن در لحظه‌ی راه‌اندازی با اتوترانس، کمتر از لحظه‌ی راه‌اندازی مستقیم است، پس گشتاور راه‌اندازی با اتوترانس نیز کمتر از گشتاور راه‌اندازی

$$\frac{T_{st1}}{T_{st2}} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \text{ است چنین است}$$

روش سوم استفاده از مقاومت یا سلف سری با سیم‌پیچ‌های استاتور است. این سبب می‌شود، که ولتاژ، روی امیدانس سری شده افت کرده و ولتاژ کمتری به ماشین برسد. پس از راه‌اندازی، این امیدانس‌ها به شکل مرحله‌ای اتصال کوتاه شده و امیدانس سری کم می‌شود. در این روش نیز گشتاور راه‌اندازی نسبت به حالت مستقیم کمتر است. افزون بر این باید توجه داشت که در اتوترانس افزایش جریان خطی است؛ ولی در سلف، نسبت $\frac{di}{dt}$ غیرخطی و کمتر از اتوترانس است، پس در لحظه‌ی راه‌اندازی جریان سلف کمتر از اتوترانس است؛ بنابراین، گشتاور راه‌اندازی با سلف از راه‌اندازی با اتوترانس کمتر است.

روش چهارم، برای ماشین‌هایی به کار می‌رود که برای کار در حالت مثلث طراحی شده‌اند و در آن باید هر دو سر کلاف‌های ماشین در دسترس باشد. نخست موتور، با یک اتصال ستاره راه‌اندازی شده و سپس اتصال، به مثلث تغییر می‌یابد. (آشکار است که ولتاژ راه‌اندازی ستاره باید برابر ولتاژ نامی مثلث تنظیم شود.) این کار با یک کلید ستاره-مثلث انجام می‌پذیرد. در اتصال ستاره، $V_l = \sqrt{3} V_{ph}$ و $I_l = I_{ph}$ ؛ ولی، در اتصال مثلث $I_l = \sqrt{3} I_{ph}$ و $V_l = V_{ph}$.

$$(P_\Delta = P_l \rightarrow \frac{V_{\Delta ph}^2}{Z_\Delta} = \frac{V_{l ph}^2}{Z_l} \rightarrow \frac{V_l^2}{Z_\Delta} = \frac{\left(\frac{V_l}{\sqrt{3}} \right)^2}{Z_l} \rightarrow Z_\Delta = 3 Z_l)$$

نوع اتصال، ولتاژ خط برابر V_1 بدهیم، برای ستاره $I_{st1l} = I_{st1ph} = \frac{V_{ph}}{Z_1} = \frac{V_l}{\sqrt{3} Z_1}$ و برای مثلث

$$\frac{I_{stll}}{I_{st\Delta l}} = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_L}{Z_1}}{\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_L}{Z_1}} = \frac{1}{3} \quad \text{این} \quad I_{st\Delta l} = \sqrt{3} I_{st\Delta ph} = \sqrt{3} \frac{V_{ph}}{Z_1} = \sqrt{3} \frac{V_L}{Z_1}$$

روش برای ماشین‌های به کار می‌رود که برای کار با ولتاژهای کم تا ۳/۳ kV طراحی شده‌اند؛ چراکه اتصال مثلث برای ولتاژهای بالا، شمار دور سیم‌پیچ زیادی می‌خواهد و این سبب گران شدن ماشین می‌شود. همچنین بهره‌گیری از کلید ستاره-مثلث نسبت به اتوترانسفورماتور ارزان‌تر است. در این روش برای گشتاور راه‌اندازی، نسبت به گشتاور راه‌اندازی مستقیم داریم

$$\frac{T_{l\Delta st}}{T_{dst}} = \left(\frac{\frac{n_r}{n_s} \frac{V_l}{\sqrt{3}}}{\frac{n_r}{n_s} V_l} \right)^2 = \frac{1}{3}$$

پس این روش نیز برای راه‌اندازی زیر بار، مناسب نیست.

روش پنجم تنها در ماشین‌های آسنکرون القایی روتور سیم‌پیچی شده‌ای به کار می‌رود، که سرهای کلاف روتور در دسترس باشد و بدین ترتیب است که مقاومت‌هایی را با سیم‌پیچ‌های روتور سری می‌کنند و از این راه، مقدار R'_r را افزایش می‌دهند. پس از آن که ماشین راه افتاد، مقاومت‌های سری شده را در چند مرحله اتصال کوتاه می‌کنند؛ تا در پایان، مقدار امپدانس سری صفر شود. هرچه در آغاز این مقاومت بیشتر باشد، جریان راه‌اندازی کمتر خواهد بود؛ اما، باید توجه کرد، که اگر اندازه‌ی آن از مقداری بالاتر باشد، ممکن است موتور، حتی در حالت بی‌بار نیز راه نیفتد. بنابراین به بررسی رابطه‌ی $T_{st} = kE_r^2 \frac{R'_r}{\sqrt{R_r'^2 + X_{rs}^2}}$ گشتاور راه‌اندازی می‌پردازیم. با مشتق گرفتن از رابطه‌ی گشتاور راه‌اندازی درمی‌یابیم مقدار $|R'_r| = |X_{rs}|$ بهینه‌ترین حالت برای $R'_r = R_r + R_{rs}$ است؛ به گونه‌ای که هم گشتاور راه‌اندازی بیشینه می‌شود و هم جریان راه‌اندازی کاهش می‌یابد. پس برای راه‌اندازی موتورهای القایی زیر بار، گونه‌ی روتور سیم‌پیچی شده بهتر است؛ گرچه این روتورها به دلیل سیم‌پیچی و نیز داشتن جاروبک گران‌تر از روتورهای قفسه‌سنجابی است.

روش آزمایش

در اینجا می‌خواهیم جریان‌های موتورهای آزمایشی را در روش‌های راه‌اندازی گوناگون به دست آورده و بررسی کنیم. از آنجا که در آزمایشگاه مقاومت یا سلف سه‌پل برای راه‌اندازی موتور

۱- R_{rs} نشانگر rotor's series resistor است.

سه‌فاز ما موجود نیست، نمی‌توانیم روش‌های راه‌اندازی با مقاومت سری با استاتور و روتور و نیز سلف سری با استاتور را انجام دهیم. افزون بر، روتور موتور آزمایشی ما از گونه‌ی قفسه‌سنجایی بوده و نمی‌توان با روتور آن مقاومتی بیرونی سری کرد. بنابراین در اینجا تنها به بررسی آزمایش‌های راه‌اندازی مستقیم در دو حالت λ و Δ ، با اتوترانسفورماتور و نیز کلید ستاره-مثلث می‌پردازیم. دستگاه‌های مورد نیاز آزمایش، افزون بر موتور القایی سه‌فاز، اتوترانس، کلید ستاره-مثلث، ولت‌سنج، آمپرسنج و سیم‌های رابط می‌باشد.

از آنجایی که جریان راه‌اندازی ممکن است تا چند برابر جریان نامی موتور بالا رود، باید دقت داشت که از آمپرسنجی با گستره مناسب استفاده کرد؛ که ما در اینجا از آمپرسنج خود واحد آزمایش استفاده خواهیم کرد. همچنین باید دقت داشت، که در هر نوع اتصال، ولتاژ را تنها تا ولتاژ نامی آن نوع بالا برد؛ که برای موتور ما این مقدار برای اتصال ستاره ۳۸۰ ولت و برای اتصال مثلث ۲۲۰ ولت است.

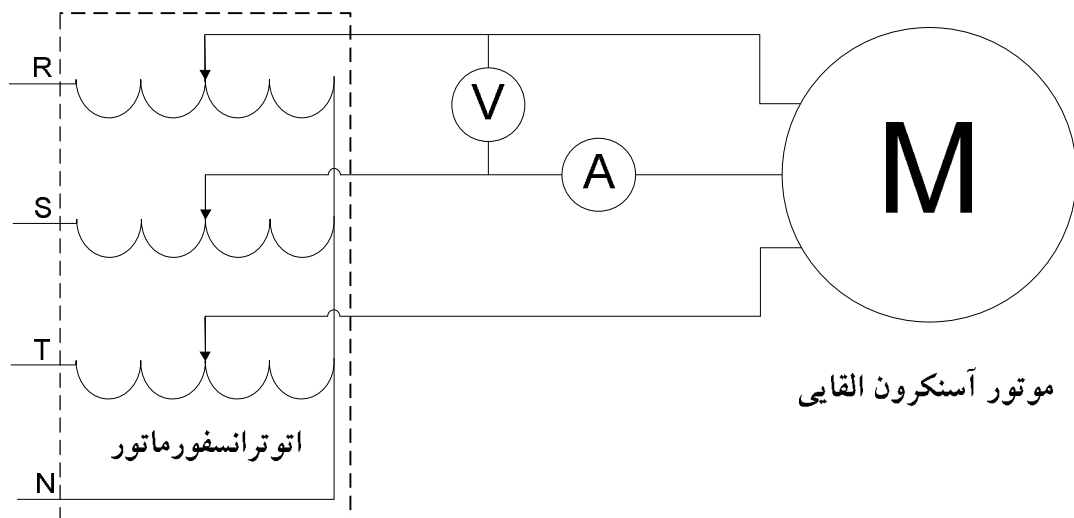
در آغاز، شش سر سیم‌پیچ‌های موتور را با رعایت ترتیب به خروجی کلید ستاره-مثلث وصل می‌کنیم و سپس سه سر ورودی کلید را به خروجی اتوترانس می‌بندیم و سرانجام نیز سه سیم ورودی اتوترانس را به همراه سیم نول آن به منبع وصل می‌کنیم. افزون بر این یک ولت‌سنج بین یک فاز و آمپرسنج واحد را نیز سر راه یک فاز قرار می‌دهیم.

در بخش نخست، موتور را به صورت λ و به صورت مستقیم به شبکه وصل می‌کنیم. برای آزمایش راه‌اندازی مستقیم ستاره، از آنجا که در اینجا ولتاژ خط با ولتاژ نامی ستاره‌ی موتور برابر است، می‌توانیم، اتوترانس را در مدار قرار ندهیم. اگر اتوترانس در مدار بود، کلید ستاره-مثلث را روی صفر گذاشته، محافظ اضافه‌بار و کلید فیوز مینیاتوری را روشن می‌کنیم و ولتاژ اتوترانس را تا ولتاژ نامی λ ، که برای ما ۳۸۰ ولت است، به آرامی می‌افزاییم؛ سپس، منبع را خاموش می‌کنیم. اکنون، کلید را در حالت λ قرارداده و منبع را روشن می‌کنیم و در هنگام راه‌اندازی جریان موتور را خوانده و می‌نویسیم.

در بخش دوم، موتور را به صورت Δ و به صورت مستقیم به شبکه وصل می‌کنیم. چون در این جا ولتاژ خط ما بیش از مقدار نامی مثلث است، ناچاریم از اتوترانس برای کاهش آن استفاده کنیم. بنابراین، نخست، کلید ستاره-مثلث را روی صفر گذاشته، محافظ اضافه‌بار و کلید فیوز مینیاتوری را روشن می‌کنیم و ولتاژ اتوترانس را تا ولتاژ نامی Δ ، که برای ما ۲۲۰ ولت است، به آرامی می‌افزاییم؛ سپس، منبع را خاموش می‌کنیم. اکنون، کلید را در حالت λ قرارداده و جریان آن را در لحظه‌ی راه‌اندازی یادداشت می‌کنیم. در اینجا تنها به این دلیل که توان موتور ما کم است،

می‌توانیم موتور را در حالت مثلث، مستقیم راه بیندازیم. برای موتورهای بزرگ به هیچ وجه مجاز به این کار نیستیم.

بخش سوم، راه‌اندازی با اتوترانس است. در آغاز باید ولتاژ اتوترانس صفر باشد. در اینجا اتصال را ستاره کرده و منبع را روشن ساخته و ولتاژ اتوترانس را به آرامی می‌افزاییم و در لحظه‌ی راه‌اندازی، جریان موتور را می‌خوانیم. این کار را با یک اتصال مثلث نیز می‌توان تکرار کرد.



بخش چهارم راه‌اندازی با کلید ستاره-مثلث است. نخست، کلید ستاره-مثلث را روی صفر گذاشته، محافظ اضافه‌بار و کلید فیوز مینیاتوری را روشن می‌کنیم و ولتاژ اتوترانس را تا ولتاژ نامی Δ ، که برای ما ۲۲۰ ولت است، به آرامی می‌افزاییم؛ سپس، منبع را خاموش می‌کنیم. اکنون، کلید را در حالت λ قرارداده و منبع را روشن می‌کنیم و در هنگام راه‌اندازی جریان موتور را خوانده و می‌نویسیم و بعد، اتصال را به Δ تغییر می‌دهیم.

داده‌های آزمایش

| پارامتر | جریان راه‌اندازی (A) | ولتاژ (V) | جریان بی‌باری (A) | روش راه‌اندازی |
|-----------------------------------|----------------------|-----------|-------------------|----------------|
| λ مستقیم | ۱۱ | ۳۸۰ | ۱ | |
| Δ مستقیم | ۲۵ | ۲۲۰ | ۳ | |
| اتوترانس λ | ۲ | ۳۸۰ | | |
| اتوترانس Δ | ۷ | ۲۲۰ | | |
| کلید $\lambda \rightarrow \Delta$ | ۱۰ | ۲۲۰ | | |

| ویژگی‌های نامی موتور آزمایش | | | | |
|-----------------------------|---------|--------|--------|---------------------------|
| V (V) | N (rpm) | P (kW) | I* (A) | P _{OutMech} (hp) |
| Δ: ۲۲۰ λ: ۳۸۰ | ۳۰۰۰ | ۲/۲ | | ۳ |

*: محاسبه شده است.

نتیجه‌ها و تحلیل آزمایش

نتایج آزمایش به دلیل بسیار زودگذر بودن جریان راه‌اندازی، در آمپرسنج‌های معمولی دارای خطای بسیار زیادی است.

همچنان که انتظار داشتیم، جریان راه‌اندازی اتصال‌های مثلث در هر روش تا سه برابر بیشتر از اتصال‌های ستاره در همان ولتاژ (یعنی، $I_I = \frac{V_{\Delta}}{V_I} I_{\Delta}$) است. برای نمونه، در ولتاژ ۲۲۰ ولت، جریان راه‌اندازی مثلث (مستقیم) تقریباً سه برابر ستاره (کلید) است.

همچنین می‌بینیم که جریان راه‌اندازی λ با اتوترانس از همه کمتر است و پس از آن جریان راه‌اندازی Δ با اتوترانس و پس از آن‌ها، کلید ستاره-مثلث است. گرچه، جریان راه‌اندازی با اتوترانس برای حالت بی‌بار یا کم‌بار بهتر است؛ ولی، به دلیل گرانی اتوترانس، بیشتر از روش‌های دیگر استفاده می‌شود.

پایان

اشکان نیوشا

<http://AshkanN.tripod.com>