



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 14, No. 3, 2023
Research Paper

Parameter Estimation of Squirrel-cage Machine using Laboratory Tests

Hengameh Kojooyan Jafari

Assistant Professor, Dept. of Electrical Engineering, Islamic Azad University-Islamshahr
Branch, Tehran, Iran

Abstract:

Recently, studies of squirrel-cage induction machines validate the idea that these machines follow the double-cage induction model; however, the manufacturers categorize these machines as single-cage machines. There are many references that use the squirrel-model for squirrel-cage machines, then machine parameters increase from 5 to 7. In the laboratory, parameter determination is performed to estimate 5 parameters; however, 7 parameters have to be determined. Also, the DC test is not an exact test and is used for approximate estimation. Therefore, locked rotor test equations are changed and an overload test is added. After measurements in the laboratory according to the equations of this paper, a MATLAB program is prepared and 7 parameters are determined in a loop until reaching the desired error. This paper demonstrates that laboratory squirrel-cage machines have to be corrected using the 7-parameter model. Furthermore, this paper shows the necessity of new laboratory test equations for squirrel-cage machines. Then a numerical method is used to determine the machine parameters.

Keywords: Squirrel-cage induction machine, double-cage machine, Squirrel-cage machine, locked-rotor test.



This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<https://doi.org/10.22108/ISEE.2022.132395.1541>

تخمین پارامترهای ماشین آسنکرون با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی

هنگامه کجوئیان جعفری

گروه برق قدرت - دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر - اسلامشهر - ایران

kojooyan@iaau.ac.ir

چکیده: مطالعات اخیر درباره ماشین‌های القایی نشان می‌دهد با وجود ساخت ماشین‌های القایی قفس سنجابی به صورت تک‌قفسی، مدل دینامیکی دقیق این ماشین‌ها به صورت مدل ماشین القایی دوقفسی است. با توجه به اینکه برای تخمین و تعیین پارامترهای ماشین القایی از روش گذرای و آزمایش‌های آزمایشگاهی استفاده می‌شود و مقالات زیادی در این زمینه موجودند، به علت تغییر در مدل این ماشین ضرورت بررسی مجدد و تصحیح آزمایش‌های آزمایشگاهی ماشین آسنکرون قفس سنجابی با این مدل جدید به منظور تخمین ۷ پارامتر مدل جدید به جای ۵ پارامتر مدل قبلی ماشین القایی قفس سنجابی، ایده اصلی این مقاله است. در این مقاله پس از اندازه‌گیری ولتاژ و جریان در آزمایشگاه با ولت متر و آمپر متر و محاسبات امپدانس، با استفاده از روابط ارائه شده برای مدل جدید ماشین قفس سنجابی و روش محاسبات عددی در برنامه کامپیوتری MATLAB کمیات مجهول ماشین به دست آمدند و تخمین زده شدند.

واژه‌های کلیدی: ماشین القایی قفس سنجابی، ماشین رتور سیم‌پیچی شده، ماشین دوقفسی، گذرای، آزمایش رتور قفل.

۱- مقدمه

ماشین نیاز به مدل ماشین آسنکرون دوقفسی است. در مقاله [۳] برای ۲۲۳ ماشین تخمین پارامترهای ماشین آسنکرون قفس سنجابی و دوقفسی به روش گذرای و با استفاده از گشتاور و توان در تعداد زیادی از نقاط گذرای به دست آمده است. با توجه به اینکه طبق پیشینه تحقیق، تخمین دقیق پارامترهای ماشین آسنکرون در مطالعه عملکرد صحیح ماشین و منحنی‌های گشتاور و جریان ماشین بسیار اهمیت دارد و با توجه به اینکه امروزه مدل ۷ پارامتری شکل ۱ قسمت b جایگزین مدل ۵ پارامتری شکل ۱ قسمت a برای ماشین آسنکرون قفس سنجابی شده است [1-7]، در این مقاله به بررسی آزمایش‌های ماشین آسنکرون قفس سنجابی مطابق با مدل جدید ۷ پارامتری پرداخته می‌شود و ضرورت تغییر در روابط تعیین پارامترهای ماشین در آزمایشگاه برای نخستین بار گوشزد می‌شود. مدل استفاده شده در این مقاله مطابق شکل ۱ فاقد مقاومت نشان‌دهنده تلفات آهنی است؛ ولی همان‌طور که در مراجع بیان شده است تلفات آهنی ناچیزند [۳]. در نهایت، پارامترهای تعیین شده در این مدل با

امروزه ماشین‌های آسنکرون یکی از پرکاربردترین ماشین‌ها در صنعت هستند و تخمین دقیق پارامترهای ماشین حائز اهمیت است. در مقاله [۱] برای یک توربین بادی با سرعت ثابت مدل ماشین آسنکرون دوقفسی و مدل قفس سنجابی ماشین تک‌قفسی بررسی شده‌اند و شبیه‌سازی‌ها نشان داده‌اند مدل قفس سنجابی تک‌قفسی نمی‌تواند با منحنی ماشین واقعی منطبق باشد. در مقاله [۲] با استفاده از روش رگرسیون به بررسی مدل ماشین تک‌قفسی قفس سنجابی پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهند برای این

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۳۱

نام نویسنده مسئول: هنگامه کجوئیان جعفری

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اسلامشهر - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر - دانشکده فنی مهندسی - گروه برق قدرت

DC، کمتر از مقاومت ac است و این آزمایش تقریبی است؛ بنابراین، تنها برای مقدار اولیه مقاومت استاتور در حلقه برنامه کامپیوتری محاسبه عددی کمیات مجهول مدل ۷ پارامتری ماشین، از این مقدار DC استفاده می‌شود.

۳- آزمایش بی‌باری

یکی از آزمایش‌های ماشین آسنکرون آزمایش بی‌باری است که در این قسمت نشان داده می‌شود فرمول‌های دو کمیت مقاومت استاتور و راکتانس آن وارد برنامه کامپیوتری تخمین می‌شوند.

در آزمایش بی‌باری مطابق شکل ۲، نتایج مدل ۷ پارامتری مانند مدل ۵ پارامتری است. مطابق روابط ریاضی (۲) و (۳) مقاومت استاتور و راکتانس استاتور همراه راکتانس مغناطیس‌کنندگی به دست می‌آیند و وارد برنامه کامپیوتری تخمین پارامترهای ماشین می‌شوند.

$$Z_{NL} = R_s + jX_{sd} + jX_m \quad (1)$$

$$\text{Re}(Z_{NL}) = R_s \quad (2)$$

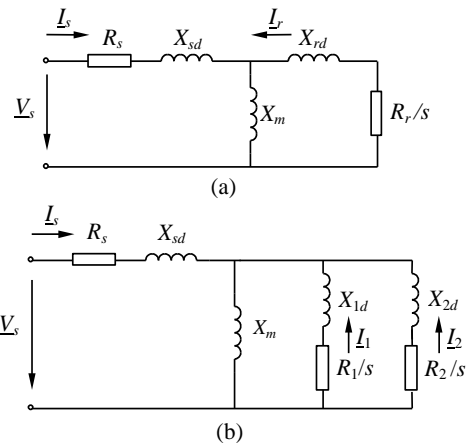
$$\text{Im}(Z_{NL}) = X_{sd} + X_m \quad (3)$$

که در معادله اخیر دو راکتانس استاتور X_{sd} و مغناطیس‌کننده X_m مجهول‌اند و Z_{NL} از اندازه‌گیری‌ها به دست می‌آید و معلوم است. نکته اینجاست که در برنامه کامپیوتری مقادیر اولیه تقریبی‌اند و پاسخ‌ها در حلقه پس از n پردازش تا رسیدن به حداقل خطای ۷ مجهول از ۷ معادله به دست می‌آیند؛ ولی مقادیر اولیه، تقریبی و با دقت وارد می‌شوند تا تعداد عملیات کمتر شوند. همچنین، کمیات امپدانس Z_{ST} و Z_{OL} یعنی به ترتیب امپدانس رتور قفل و امپدانس اورلود که در بخش مربوط به خود اشاره می‌شود، از مقادیر اندازه‌گیری‌شده در آزمایشگاه در فرمول‌ها قرار داده می‌شوند.

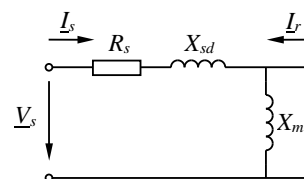
۴- آزمایش رتور قفل

در این آزمایش مطابق شکل ۲ لغزش ۱ است و با استفاده از اندازه‌گیری‌ها ابتدا Z_{ST} و سپس معادلات مداری (۴) الی (۷) از شکل ۲ به دست می‌آیند.

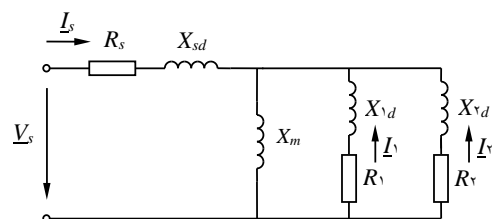
برنامه کامپیوتری در MATLAB ۲۰۱۴ و روش محاسبات عددی تعیین می‌شوند. پارامترهای واقعی ماشین نمونه برای مقایسه با پارامترهای تخمین زده شده از مقاله معتبر مرجع استخراج شده‌اند [۶].



شکل ۱- مدل ۵ پارامتری قدیمی ماشین قفس سنجایی و مدل ۷ پارامتری جدید ماشین آسنکرون در حالت ماندگار طبق مقاله مرجع تصحیح استاندارد IEEE-112 [1-7].



شکل ۲- مدل ۵ پارامتری و مدل ۷ پارامتری ماشین آسنکرون در حالت بی‌باری [4]



شکل ۳- مدل ۷ پارامتری ماشین آسنکرون در آزمایش رتور قفل که در آن $s = 1$ [۴]

۲- آزمایش DC

آزمایش DC دقیق نیست؛ زیرا به علت اثر پوستی مقاومت DC استاتور به دست آمده از اندازه‌گیری کمیات

پایان حلقه پاسخ حل ۷ معادله مذکور، ۷ پارامتر مدل ۷ پارامتری ماشین قفس سنجایی هستند. دلیل ارائه نشدن یک فلوچارت ساده در اینجا این است که برنامه محاسبات عددی استفاده شده تنها به حل ۷ معادله ۷ مجهولی می پردازد و در مقالات معتبر مثل استاندارد IEEE-112 و مقالات معتبر [۷-۱] نیز برای تخمین پارامترهای ماشین فلوچارت استفاده نشده است.

۶- رابطه کلیدی

در استاندارد IEEE-112 رابطه (۱۱) معتبر است و می توان از آن استفاده کرد. یعنی می توان به جای استفاده از آزمایش آور لود از رابطه تجربی (۱۲) نیز استفاده کرد که ضریب وزنی ω در آن تجربی و بستگی به توان ماشین دارد. این ضریب تجربی برای ماشین نمونه 10 hp در این مقاله ۶۳ است. S_{FL} در این روابط لغزش در بار کامل است. ضریب وزنی ω به طور تجربی برای ماشین های کوچک، متوسط و بزرگ به سه دسته تقسیم می شوند؛ به طوری که ضرایب هر دسته به هم نزدیک اند.

$$R_{r2} \gg S_{FL} X_{sd} \quad (11)$$

$$R_{r2} = \omega S_{FL} X_{sd} \quad (12)$$

۷- مطالعه تخمین پارامترها

به علت مطالعات مرجع مدل ماشین قفس سنجایی در آزمایشگاه مدل ماشین دوقفسی است؛ بنابراین، پس از اندازه گیری ها و محاسبات کامپیوتری برای ماشین نمونه با توان 10 hp در جدول ۱ نتایج تخمین پارامترها با استفاده از روش فوق مشاهده می شوند. در این جدول، داده های واقعی از مقاله معتبر مرجع استخراج شده اند [۶] و داده های تخمینی نشان می دهند این روش می تواند در آزمایشگاه ماشین آسنکرون برای تعیین پارامترهای ماشین قفس سنجایی استفاده شود. جدول ۲ مقایسه نتایج تخمین پارامترهای ماشین قفس سنجایی در آزمایشگاه با استفاده از دستگاه های اندازه گیری به روش قدیم و نتایج این مقاله

$$Z_1 + Z_2 = \frac{1}{\frac{1}{Z_{ST} - (R_s + jX_{sd})} - \frac{1}{X_m}} \quad (4)$$

$$R_{r2} = \text{Re} \left(\frac{1}{\frac{1}{Z_{ST} - (R_s - jX_{sd})} - \frac{1}{X_m} - \frac{1}{(R_{r1} + jX_{rd1})}} \right) \quad (5)$$

$$X_{rd2} = \text{Im} \left(\frac{1}{\frac{1}{Z_{ST} - (R_s - jX_{sd})} - \frac{1}{X_m} - \frac{1}{(R_{r1} + jX_{rd1})}} \right) \quad (6)$$

$$X_{rd2} = X_{sd} \quad (7)$$

در معادله (۴) در برنامه کامپیوتری، به راکتانس استاتور مقدار اولیه از آزمایش DC می دهیم و به سایر کمیات سمت راست معادله نیز کمیات اولیه می دهیم تا کمیات سمت راست به دست آیند و معادلات (۵) و (۶) را نیز برای پردازش اول به دست می آوریم. سپس در تکرارهای بعدی در حلقه خطای کمیات مجهول کاهش می یابد و پردازش تا رسیدن به حداقل خطا تکرار می شود. درخور ذکر است معادله (۷) از معادلات استاندارد مربوط به کارخانه سازنده است که در مقالات مرجع به عنوان رابطه مهم استفاده می شود [۷-۱].

۵- آزمایش اضافه بار

در این آزمایش مطابق شکل ۴ با در نظر گرفتن $S_{OL} = 2S_{FL}$ و از اندازه گیری ها ابتدا Z_{OL} سپس معادلات (۸) الی (۱۰) به دست می آیند.

$$Z_1 = \frac{1}{\frac{1}{Z_{OL} - (R_s + jX_{sd})} - \frac{1}{X_m} - \frac{1}{\left(\frac{R_{r2}}{S_{OL}} + jX_{rd2}\right)}} \quad (8)$$

$$R_{r1} = \text{Re} \left(\frac{s}{\frac{1}{Z_{OL} - (R_s + jX_{sd})} - \frac{1}{X_m} - \frac{1}{\left(\frac{R_{r2}}{S_{OL}} + jX_{rd2}\right)}} \right) \quad (9)$$

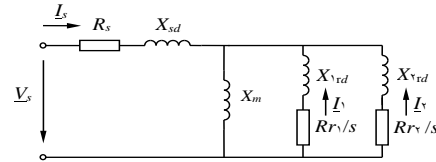
$$X_{rd1} = \text{Im} \left(\frac{1}{\frac{1}{Z_{OL} - (R_s + jX_{sd})} - \frac{1}{X_m} - \frac{1}{\left(\frac{R_{r2}}{S_{OL}} + jX_{rd2}\right)}} \right) \quad (10)$$

در نتیجه، معادلات (۹) و (۱۰) در حلقه برنامه کامپیوتری تا رسیدن به حداقل خطا استفاده می شوند و در

۸- نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه مطابق پیشینه تحقیق مدل جدید ماشین آسنکرون قفس سنجابی همان دوقفسی است [۷-۱]، این مقاله به بررسی تخمین پارامترهای ماشین از اندازه‌گیری‌های آزمایش‌های آزمایشگاهی با استفاده از روش محاسبات عددی می‌پردازد و ضرورت تغییر در نحوه محاسبات کمیات مدل ۷ پارامتری به جای مدل ۵ پارامتری را نشان می‌دهد و با استفاده از برنامه کامپیوتری، تخمین دقیق‌تر پارامترهای ماشین قفس سنجابی را نشان می‌دهد.

است. تفاوت مدل و مقادیر پارامترها نشان‌دهنده ضرورت این تحقیق‌اند.



شکل ۴- مدل ۷ پارامتری ماشین آسنکرون در آزمایش

$$S = S_{OL} \text{ در آن } S \text{ اضافه بار یا اورلود که در آن [6]}$$

جدول ۱- مقادیر واقعی و تخمینی ماشین آسنکرون قفس سنجابی ۱۰hp بر حسب اهم از برنامه فوق

$P(\text{hp})$	machine	R_s	X_{sd}	X_m	R_1	X_{1d}	R_2	X_{2d}
10	Original	۰,۳۰۸۶۱	۱,۸۴۹۶۶	۳۸,۸۳۱۱۵	۰,۶۸۰۷	۲,۲۱۹۵۳	۲,۵۷۷۲۱	۱,۸۴۹۶۶
	Estimate	۰,۳۰۹۱	۱,۸۴۹۳۶	۳۸,۸۳۱	۰,۶۷۷۹	۲,۲۱۲۴	۲,۵۸۹۶	۱,۸۴۹۳۶

جدول ۲- مقادیر تخمینی قبلی در آزمایشگاه‌های ماشین و تخمینی جدید ماشین آسنکرون قفس سنجابی ۱۰ hp بر حسب اهم

$P(\text{hp})$	Estimate	R_s	X_{sd}	X_m	R_1	X_{1d}	R_2	X_{2d}
10	New	۰,۳۰۹۱	۱,۸۴۹۳۶	۳۸,۸۳۱	۰,۶۷۷۹	۲,۲۱۲۴	۲,۵۸۹۶	۱,۸۴۹۳۶
	Old	۰,۳۰۸۶۱	۱,۶۶۵۲۹	38/9446	۰,۵۴۴۶	۱,۶۶۵۲۹	-	-

- [3]J. Pedra and F. Corcoles, Estimation of Induction Motor Double-Cage Model Parameters From Manufacturer Data, IEEE Trannergy Conversion, Vol. 19, No. 2, June 2004, pp. 310-317.
- [4]Hengameh Kojooyan Jafari, Starter ignore for Asynchronous Squirrel-cage machine with new Locked-rotor test, The third conference of science and Engineering research of kasem-Bundit University of Thailand, 21 Aug.2017.
- [5]Hengameh Kojooyan Jafari, Effect of Stator Reactance on Asynchronous machine parameter determination, the first National Congress on Power and Energy, 2017, pp. 17-19.
- [6]J. Pedra and L. Sainz, Parameter estimation of squirrel-cage induction motors without torque measurements, IEE Proc. Electric Power Applications, Vol. 153, No. 2, March 2006, pp. 263-270.
- [7]F. Corcoles, J. Pedra, M. Salichs and L. Sainz, Analysis of the induction machine parameter identification, IEEE Trans. Energy Conversion, Vol 17, No 2, June 2002, pp. 183-190.

۹- تقدیر و تشکر

از راهنمای‌های استاد گرامی، دکتر خوآکین پدرا در دوران که ایشان مدل جدید ماشین القایی و مطالعات جدید استاندارد IEEE-112 را ابداع و منتشر کردند، تقدیر و تشکر می‌شود.

۱۰-مراجع

- [1]J. Pedra, Estimation of typical squirrel-cage induction motor parameters for dynamic performance simulation, IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. , Vol. 153, No. 2, March 2006, pp. 137-146.
- [2]J. Pedra and F. Corcoles and et al, On Fixed-Speed WT Generator Modeling for Rotor Speed Stability Studies, IEEE Transactions on Power Systems, 2011.