

مدلسازی جامع شرایط نامتعادلی موتور القایی به منظور ارزیابی دقیق عملکرد حالت ماندگار بر اساس شاخص نامتعادلی جریان مختلط (CCUF)

سعید مقصودی^۱، یوسف کاظمی سنجی^۲، محمد فرهادی کنگرلو^{۳*} و سجاد گلوانی^۴

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۵ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۲	این مقاله پس از مطالعه‌ای جامع در بحث نامتعادلی ولتاژ و ذکر معایب بعضی از معیارهای نامتعادلی موجود، به اهمیت در نظر گرفتن زاویه شاخص نامتعادلی ولتاژ مختلط (CVUF) در تحلیل شرایط نامتعادلی می‌پردازد. سپس در راستای ارزیابی دقیق عملکرد حالت ماندگار موتور القایی در شرایط نامتعادل، مقاله بر روی شاخص نامتعادلی جریان مختلط (CCUF) متمرکز شده که این شاخص برگرفته از شاخص نامتعادلی ولتاژ مختلط و شاخص نامتعادلی امپدانس (IUF) بوده و علاوه بر نامتعادلی ولتاژ تأثیر پارامترهای ماشین را نیز در نظر می‌گیرد. از آنجاکه پارامترهای ماشین بر عملکرد ماشین در شرایط نامتعادل تأثیر می‌گذارند، شاخص نامتعادلی جریان مختلط با در نظر گرفتن پارامترهای ماشین تخمینی دقیق‌تر از گشتاور و توان خروجی ماشین به دست می‌دهد. در این مقاله با تکیه بر شاخص نامتعادلی جریان مختلط بهبود عملکرد ماندگار موتور القایی در شرایط نامتعادل با کویل کردن دو موتور کوچک‌تر نسبت به یک موتور بزرگ‌تر مورد بررسی و اثبات قرار گرفته است.
واژگان کلیدی: شاخص نامتعادلی ولتاژ (VUF)، موتور القایی (IM)، شاخص نامتعادلی ولتاژ مختلط (CVUF)، شاخص نامتعادلی جریان مختلط (CCUF).	

۱- مقدمه

شبکه‌های تغذیه‌کننده لوکوموتیوهای برقی نمونه‌ای از شبکه‌های دارای نامتعادلی ولتاژ زیاد هستند. امروزه با توجه به گسترش استفاده از قطارهای برقی در کشورهای در حال توسعه این مشکل جدی‌تر شده و نیاز بیشتری برای توجه مهندسیین برق به این مسئله احساس می‌شود. ماشین‌های القایی به علت سادگی، پایین بودن هزینه نگهداری، راه اندازی ساده و سایر ویژگی‌ها پرکاربردترین ماشین‌های الکتریکی در صنعت می‌باشند [۲]. این نوع موتور حتی در کاربردهای کشش الکتریکی نیز به وفور استفاده می‌شود [۳]. پدیده نامتعادلی ولتاژ دارای اثرات منفی بر عملکرد موتورهای القایی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین

با گسترش استفاده از تجهیزات حساس الکترونیکی موضوع کیفیت توان دارای اهمیت روزافزونی شده است [۱]. نامتعادلی ولتاژ به عنوان یکی از پدیده‌های رایج مورد مطالعه در بحث کیفیت توان در شبکه‌های ضعیف و شبکه‌های دارای بارهای تکفاز بزرگ نمود بیشتری دارد. بر اساس گزارش ANSI، نامتعادلی ولتاژ در ۶۶ درصد سیستم‌های توزیع برق آمریکا کمتر از یک درصد و در ۹۸ درصد سیستم‌های توزیع برق آمریکا کمتر از سه درصد می‌باشد. بنابراین، در دو درصد شبکه توزیع آمریکا برخلاف استاندارد IEC^۵ نامتعادلی ولتاژ بیش از سه درصد است.

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.farhadi@urmia.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری مهندسی برق قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه ارومیه

۲. دانشجوی دکتری مهندسی برق قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه ارومیه

۳. دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه ارومیه

۴. دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه ارومیه

^۵ International Electrotechnical Commission (IEC)

ولتاژ معرفی شده توسط نهادهای مختلف، تأثیر آن بر روی شاخص تنزل مورد ارزیابی قرار گرفته است. در [۱۴] شاخص تنزل بر اساس تعریف NEMA مورد بررسی قرار گرفته در حالی که در [۱۷] با استفاده از شاخص نامتعادلی مختلط برای یک موتور القایی که تحت شرایط نامتعادل قرار دارد تعیین می‌گردد. بر اساس تئوری مؤلفه‌های متقارن [۱۸]، نامتعادلی ولتاژ به‌عنوان پدیده‌ای که مؤلفه مثبت توسط مؤلفه‌های منفی و صفر دچار اختلال می‌گردد در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که مؤلفه صفر ولتاژ در ولتاژ خط و نیز در بارهای فاقد اتصال نوترال به زمین ظاهر نمی‌گردد، مؤلفه منفی تنها عنصر مهم نامتعادلی ولتاژ در بسیاری از سیستم‌ها می‌باشد. به علت نزدیک بودن مؤلفه مثبت به مقدار نامی و در نتیجه برابری تقریبی آن با یک پریونیت، در محاسبات پریونیتی، VUF تقریباً برابر با ولتاژ مؤلفه منفی می‌باشد. باین‌حال به علت وابسته بودن صرف این شاخص‌ها به دامنه ولتاژ و نادیده گرفتن فاز، تخمین دقیقی از وضعیت نامتعادلی ندارند. بعدها برای رفع این مشکل شاخص yCVUF ارائه گردید که برابر با نسبت فازور ولتاژ مؤلفه منفی به فازور ولتاژ مؤلفه مثبت بوده و کمیته مختلط و دارای دامنه و فاز می‌باشد. در [۱۰، ۱۱، ۱۵، ۱۷، ۱۹]، عملکرد موتور القایی در شرایط نامتعادل با بهره‌گیری از CVUF و با در نظر گرفتن زاویه CVUF مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱۸] به‌منظور نشان دادن اهمیت تأثیر زاویه CVUF بر عملکرد موتور در شرایط نامتعادل، عملکرد متفاوت یک موتور در تغذیه با دو مجموعه ولتاژ با دامنه CVUF برابر ولی با فاز CVUF متفاوت نشان داده شده است. در مراجع مذکور تأکید شده که دامنه و فاز CVUF برای ارزیابی عملکرد موتور القایی در شرایط نامتعادل کافی می‌باشند، در حالی که [۱۷] با تأیید کاهش خطای محاسبات با استفاده از VUF به‌صورت مختلط، وجود خطا در ارزیابی شاخص تنزل یک موتور القایی سه‌فاز با استفاده از CVUF را اثبات می‌نماید. در [۲۰] ارزیابی دقیق عملکرد حالت ماندگار موتور القایی تحت ولتاژ نامتعادل ارائه شده است و اثبات گردیده که تنها دامنه و زاویه ضریب نامتعادلی CVUF به‌منظور ارزیابی دقیق عملکرد موتور القایی کافی نبوده و آگاهی یافتن از هر دو شاخص درجه و نیز رفتار

بارهای صنعتی می‌باشد که از آن جمله می‌توان به گرم شدن^۱، افزایش تلفات، تنزل^۲، نوسان و کاهش گشتاور تولیدی، کاهش بازده، نامتعادلی جریان خط، نوسان در جریان و سایر موارد اشاره کرد. تأثیر نامتعادلی ولتاژ بر ویژگی‌های موتور القایی از جمله بازده، تلفات، توان خروجی، ضریب قدرت، گشتاور خروجی، دمای سیم‌پیچی، عمر عایقی، شاخص تنزل^۳ و ... در [۴-۹] مطالعه شده است. امروزه با توجه به مسائلی همچون کیفیت توان و پایداری سیستم‌های قدرت، مطالعه عملکرد موتور القایی در شرایط نامتعادلی ولتاژ اهمیت بیشتری یافته است [۱۰-۱۲]. از آنجا که طراحی، حفاظت، نگهداری، تخمین عمر و به‌طور کلی عملکرد عادی و پایدار این موتورها وابسته به میزان نامتعادلی ولتاژ آن‌ها می‌باشد، به دست آوردن یک استاندارد مناسب برای سنجش نامتعادلی و نیز مطالعه تأثیر نامتعادلی بر عملکرد موتورها دارای اهمیت زیادی می‌باشد.

در گذشته بیشتر شاخص‌هایی چون VUF^4 [۱۳] یا نسبت اندازه ولتاژ مؤلفه منفی به مثبت (تعریف شده توسط استاندارد IEC) [۱۴] و $PVUF^5$ یا نسبت حداکثر انحراف از میانگین دامنه‌های ولتاژهای سه‌فاز به این میانگین (تعریف شده توسط استاندارد NEMA^۶) برای ارزیابی در شرایط نامتعادلی استفاده می‌شدند. به دلیل اینکه PVUF تنها از دامنه ولتاژها در محاسبات استفاده می‌کند استفاده از آن ساده‌تر از VUF می‌باشد در حالی که VUF به علت استفاده از مؤلفه‌های متقارن ولتاژ، علاوه بر دامنه به اطلاعات فاز ولتاژها نیز احتیاج دارد. در [۱۵] آنالیز عملکرد یک موتور القایی سه‌فاز با استفاده از دو تعریف مذکور نامتعادلی مورد مقایسه قرار گرفته و تفاوت میان مشخصه گشتاور-سرعت و بازده موتور بر اساس دو روش تحلیل شده است. در [۱۶] مؤلفه ترتیب منفی نرمالیزه شده ولتاژ به‌جای VUF به‌منظور بررسی نامتعادلی مورد استفاده قرار گرفته - است. در [۱۵] با استفاده از تعاریف مختلف نامتعادلی ولتاژ، تغییرات ولتاژ نامتعادل در مکان هندسی سه‌بعدی رسم شده تا بازه تغییرات ولتاژهای ترمینال را کاهش دهد. در [۱۴] عملکرد صحیح ماشین القایی در حضور نامتعادلی ولتاژ همراه با اضافه ولتاژ و نیز کاهش ولتاژ مورد بررسی قرار گرفته و ضمن ارائه تعاریف مختلف نامتعادلی

⁵ The Percent Voltage Unbalance Factor defined by NEMA standards

⁶ National Electrical Manufacturers Association (NEMA)

⁷ Complex Voltage Unbalance Factor

¹ Over heating

² Derating

³ Derating factor

⁴ The Voltage Unbalance Factor defined by IEC standards

دوم این مقاله پس از مروری بر تئوری مؤلفه‌های متقارن و مدل موتور القایی در شرایط نامتعادل و تعدادی از معادلات حاکم بر شرایط نامتعادل و بر موتور القایی، روابط میان گشتاور موتور القایی و تعدادی از مدل‌های نامتعادلی ارائه می‌گردد. سپس در بخش سوم، روابط حاصل از کوپل کردن موتورهای القایی ارائه می‌شود. در بخش چهارم، نتایج شبیه‌سازی ارائه شده و بخش پنجم نیز به نتیجه‌گیری اختصاص یافته است. نرم‌افزار MATLAB نیز به‌عنوان ابزاری برای شبیه‌سازی و به دست آوردن نتایج استفاده شده است.

۲- مدار معادل و روابط موتور در شرایط نامتعادل

۲-۱- مدار معادل موتور القایی در شرایط نامتعادل

مدل به کارگرفته شده بر اساس مدار معادل یک‌فاز موتور القایی در این مقاله به ازای مؤلفه‌های مثبت و منفی به ترتیب مطابق قسمت (الف) و (ب) شکل (۱) می‌باشد. به دلیل اینکه سیم‌پیچ‌های موتور القایی به‌صورت اتصال ستاره بسته شده‌اند، مؤلفه صفر وجود نداشته و مؤلفه منفی تنها عامل نامتعادلی می‌باشد. تنها تفاوت دو مدار معادل مؤلفه مثبت و منفی به مقاومت معادل روتور برمی‌گردد. به دلیل اینکه مؤلفه‌های مثبت و منفی هر دو متقارن می‌باشند، اصل جمع آثار می‌تواند به‌منظور بررسی عملکرد کلی موتور به کار گرفته‌شود [۲۱-۲۳]. در شکل (۱)، X_s و R_s به ترتیب مقاومت و راکتانس استاتور و R_r و X_r نیز به ترتیب مقاومت و راکتانس روتور بوده و X_m نیز راکتانس مغناطیس‌کنندگی می‌باشد. همچنین، I_{sp} و I_{sn} به ترتیب فازورهای جریان ترتیب مثبت و منفی استاتور و I_{rp} و I_{rn} به ترتیب فازورهای جریان ترتیب مثبت و منفی روتور هستند. متغیر s نیز لغزش را نشان می‌دهد.

۲-۲- تحلیل مؤلفه‌های متقارن

بر اساس تبدیل فورسکیو در تئوری مؤلفه‌های متقارن، مؤلفه‌های مثبت و منفی ولتاژ بر اساس ولتاژهای فازهای مختلف به ترتیب مطابق روابط (۱) و (۲) به‌دست می‌آیند:

$$V_p = \frac{V_a + aV_b + a^2V_c}{3} = V_p \angle \beta \quad (1)$$

$$V_n = \frac{V_a + a^2V_b + aV_c}{3} = V_n \angle \beta + \theta_v \quad (2)$$

نامتعادلی ولتاژ منبع که به ترتیب در CVUF و IUF بازتاب می‌یابد، برای ارزیابی دقیق عملکرد موتور القایی مهم می‌باشد. همچنین، نشان داده شده که به ازای یک مقدار ثابت CVUF، محاسبه دقیق بازده، ضریب توان، تلفات و ... ممکن نبوده و آگاهی دقیق از شرایط نامتعادلی ولتاژ نیز موردنیاز است. علاوه بر این، تأثیر زاویه نامتعادلی بر عملکرد موتور القایی و الگوی ولتاژ تحلیل شده و نتایج به‌دست آمده حساسیت بالای ضریب تنزل و تلفات اهمی را نسبت به این زاویه نشان می‌دهد. درنهایت، ارتباط میان IUF و ولتاژ مؤلفه مثبت به ازای مقادیر ثابت k_p نیز مورد بحث قرار گرفته است.

با وجود مزایای ذکرشده، CVUF به علت نادیده گرفتن پارامترهای ماشین با نارسایی‌هایی مواجه بوده که به‌منظور در نظر گرفتن تأثیر پارامترهای ماشین، این شاخص با IUF^۱ ترکیب شده و شاخص CCUF^۲ مطرح گردیده است. این شاخص با وابستگی به مؤلفه‌های مثبت و منفی جریان عبوری از سیم‌پیچ‌های استاتور و نیز روتور، هم به نامتعادلی ولتاژها (هم دامنه و هم فاز) و هم به پارامترهای ماشین بستگی دارد و به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین شاخص‌ها می‌تواند برای تخمین دقیق توان خروجی یک موتور القایی و نیز تحلیل مشخصه گشتاور-سرعت موتور القایی مورد استفاده قرار گیرد. بر اساس مطالعات صورت گرفته در تعدادی از مقالات گذشته، یک شاخص نامتعادلی که بتواند ارزیابی دقیقی از عملکرد موتور در شرایط نامتعادل ارائه دهد باید هم میزان نامتعادلی و هم پارامترهای ماشین را در تحلیل لحاظ نماید. به دلیل اینکه شاخص CCUF می‌تواند علاوه بر مؤلفه‌های مثبت و منفی جریان عبوری از سیم‌پیچ‌های استاتور، مؤلفه‌های مثبت و منفی جریان عبوری از سیم‌پیچ‌های روتور را نیز در نظر بگیرد، هم تأثیر میزان نامتعادلی و هم تأثیر پارامترهای ماشین را به ترتیب از طریق تحلیل CVUF و IUF در نظر می‌گیرد.

در این مقاله از CCUF در تحلیل عملکرد موتور در شرایط نامتعادل استفاده شده است. همچنین، بهبود عملکرد ماندگار موتور القایی در حالت متصل‌کردن دو موتور کوچک‌تر که مجموع توان آن‌ها برابر با یک موتور بزرگ‌تر می‌باشد، در مقایسه با یک موتور بزرگ‌تر با استفاده از شاخص CCUF مورد مطالعه قرار گرفته است. در بخش

² Complex Current Unbalance

¹ Impedance Unbalance Factor

رابطه فوق این چنین اثبات می شود که چون مؤلفه مثبت ولتاژ فاز ۳۰ درجه عقب تر از مؤلفه مثبت ولتاژ خط بوده و مؤلفه منفی ولتاژ فاز ۳۰ درجه جلوتر از مؤلفه منفی ولتاژ خط می باشد، بنابراین نسبت U_n / U_p به اندازه ۶۰ درجه عقب تر از نسبت V_n / V_p می باشد.

۴-۲- الگوی ولتاژ در شرایط نامتعادل

با استفاده از روابط (۱) و (۲)، رابطه میان ولتاژهای سه فاز به صورت معادله (۱۰) در نظر گرفته می شود.

$$V_{sa} = AV_{sb} + BV_{sc} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، A و B ضرایب ولتاژ فاز بوده و با تغییر زاویه نامتعادلی تغییر می کنند و موجب تغییر ولتاژهای فاز می شوند. ضرایب A و B به ترتیب از معادلات (۱۱) و (۱۲) به دست می آیند.

$$A = \frac{\tan \theta_v + \sqrt{3}}{2 \tan \theta_v} \quad (11)$$

$$B = \frac{\tan \theta_v - \sqrt{3}}{2 \tan \theta_v} \quad (12)$$

فرض می کنیم نسبت ولتاژهای خط مطابق معادله (۱۳) باشد:

$$U_{ab} : U_{bc} : U_{ca} = 1 : X : Y \quad (13)$$

اگر دامنه ولتاژها مشخص باشد و فاز آنها تغییر کند، X و Y تغییر خواهند کرد. با توجه به روابط (۵) تا (۷) رابطه زیر را می توان به دست آورد:

$$X = \frac{a^2 + aK_u}{1 + K_u} \quad (14)$$

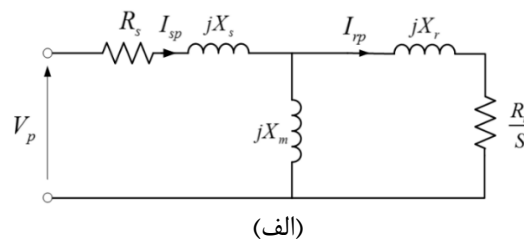
$$Y = \frac{a + a^2K_u}{1 + K_u} \quad (15)$$

بنابراین با در اختیار داشتن دامنه و فاز CVUF بر اساس روابط (۱۴) و (۱۵) مقادیر X و Y محاسبه شده و در نتیجه نسبت ولتاژهای خط به دست می آید. از طرف دیگر با در اختیار داشتن ولتاژهای خط می توان به راحتی X و Y را از رابطه (۱۳) به دست آورده و در نهایت مقادیر دامنه و فاز CVUF را به دست آورد. لازم به ذکر است که X و X به ترتیب از تقسیم V_{bc} و V_{ca} بر V_{ab} به دست می آیند و در روابط (۱۴) و (۱۵) برابر با اندازه طرف راست معادله هستند.

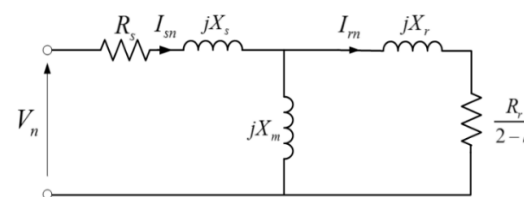
۵-۲- مؤلفه های ترتیب مثبت و منفی امیدانس

مؤلفه های ترتیب مثبت و منفی امیدانس ورودی به ترتیب از روابط (۱۶) و (۱۷) به دست می آیند.

در روابط فوق a عملگر فورتسکیو بوده و برابر با $\exp(j2\pi/3)$ می باشد. همچنین β و $\beta + \theta_v$ به ترتیب فاز مؤلفه های مثبت و منفی ولتاژ می باشند.



(الف)



(ب)

شکل ۱- مدار معادل موتور القایی، (الف) ترتیب مثبت، (ب) ترتیب منفی

۲-۳- شاخص نامتعادلی ولتاژ مختلط (CVUF)

با استفاده از روابط (۱) و (۲) رابطه زیر حاصل می شود:

$$VUF = \left| \frac{V_n}{V_p} \right| \quad (3)$$

$$CVUF = \frac{V_n}{V_p} = K_v = k_v \angle \theta_v \quad (4)$$

در رابطه (۴)، k_v و θ_v به ترتیب به دامنه و زاویه CVUF اشاره دارند.

بر اساس تبدیل فورتسکیو و با توجه به صفر بودن مجموع ولتاژهای خط، مؤلفه صفر حاصل از ولتاژهای خط برابر با صفر بوده ($U_0 = 0$) و روابط زیر حاصل می شود:

$$U_{ab} = U_p + U_n \quad (5)$$

$$U_{bc} = a^2 U_p + a U_n \quad (6)$$

$$U_{ca} = a U_p + a^2 U_n \quad (7)$$

بنابراین در تحلیل نامتعادلی ولتاژهای خط، CVUF برابر است با:

$$K_u = U_n / U_p = k_u \angle \theta_u \quad (8)$$

به آسانی می توان نشان داد که میان K_u و K_v رابطه (۹) برقرار است:

$$K_u = K_v \cdot \exp(-j60^\circ) \quad (9)$$

مؤلفه مثبت جریان روتور بوده و از رابطه (۲۲) به دست می‌آید:

$$CUFR = \frac{I_m}{I_{rp}} = K_{cr} \angle \theta_{cr} \quad (22)$$

در رابطه (۲۲)، k_{cr} و θ_{cr} به ترتیب دامنه و فاز CUFR می‌باشند.

۲-۷- تحلیل روابط حالت ماندگار موتور القایی در شرایط نامتعادل

بر اساس تبدیل فورسکیو، جریان‌های استاتور به صورت روابط (۲۳) تا (۲۵) در نظر گرفته می‌شود:

$$I_{sa} = I_{sp} + I_{sn} \quad (23)$$

$$I_{sb} = a^2 I_{sp} + a I_{sn} \quad (24)$$

$$I_{sc} = a I_{sp} + a^2 I_{sn} \quad (25)$$

اندازه جریان‌های استاتور به‌عنوان تابعی از θ_{cs} و k_{cs} استفاده از روابط (۲۳) تا (۲۵) به صورت روابط (۲۶) تا (۲۸) بازنویسی می‌شود.

$$|I_{sa}| = |I_{sp}| \sqrt{1 + k_{cs}^2 + 2k_{cs} \cos(\theta_{cs})} \quad (26)$$

$$|I_{sb}| = |I_{sp}| \sqrt{1 + k_{cs}^2 + 2k_{cs} \cos(\theta_{cs} - \frac{2\pi}{3})} \quad (27)$$

$$|I_{sc}| = |I_{sp}| \sqrt{1 + k_{cs}^2 + 2k_{cs} \cos(\theta_{cs} + \frac{2\pi}{3})} \quad (28)$$

لازم به ذکر است که θ_{cs} از رابطه (۲۹) به دست می‌آید:

$$\theta_{cs} = \theta_v + \varphi_p - \varphi_n \quad (29)$$

به‌طور مشابه در مورد اندازه جریان‌های روتور به‌عنوان تابعی از k_{cr} و θ_{cr} ، روابط زیر به دست می‌آیند:

$$|I_{ra}| = |I_{rp}| \sqrt{1 + k_{cr}^2 + 2k_{cr} \cos(\theta_{cr})} \quad (30)$$

$$|I_{rb}| = |I_{rp}| \sqrt{1 + k_{cr}^2 + 2k_{cr} \cos(\theta_{cr} - \frac{2\pi}{3})} \quad (31)$$

$$|I_{rc}| = |I_{rp}| \sqrt{1 + k_{cr}^2 + 2k_{cr} \cos(\theta_{cr} + \frac{2\pi}{3})} \quad (32)$$

I_{max} را به‌عنوان حداکثر جریان‌های استاتور در نظر گرفته می‌شود:

$$Z_{sp} = (R_s + jX_s) + \quad (16)$$

$$\frac{(R_r/S + jX_r) * jX_m}{R_r/S + j(X_m + jX_r)} = Z_{sp} \angle \phi_p$$

$$Z_{sn} = (R_s + jX_s) + \quad (17)$$

$$\frac{(R_r/(2-S) + jX_r) * jX_m}{R_r/(2-S) + j(X_m + jX_r)} = Z_{sn} \angle \phi_n$$

در این روابط φ_p و φ_n به ترتیب زوایای مؤلفه‌های مثبت و منفی امپدانس ورودی هستند.

۲-۶- شاخص نامتعادلی جریان مختلط (CCUF)

با افزایش ولتاژ نامتعادل، جریان‌های ترتیب مثبت و منفی استاتور و روتور نیز افزایش می‌یابند. مؤلفه‌های ترتیب مثبت و منفی جریان استاتور را به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$I_{sp} = \frac{V_p}{Z_{sp}} = I_{sp} \angle \beta - \phi_p \quad (18)$$

$$I_{sn} = \frac{V_n}{Z_{sn}} = I_{sn} \angle \beta + \theta_v - \phi_n \quad (19)$$

به علت اهمیت بالای CCUF، این شاخص برای استاتور و روتور جداگانه نوشته می‌شود. به این ترتیب که CUFS^۱ برای سنجش میزان نامتعادلی جریان استاتور به کار می‌رود و مطابق رابطه (۲۰) برابر با نسبت مؤلفه منفی به مؤلفه مثبت جریان استاتور می‌باشد:

$$CUFS = \frac{I_{sn}}{I_{sp}} = K_{cs} \angle \theta_{cs} = \left| \frac{Z_p}{Z_n} \right| k_v \angle (\theta_v + \varphi_p - \varphi_n) \quad (20)$$

در رابطه (۲۰) k_{cs} و θ_{cs} به ترتیب دامنه و فاز CUFS می‌باشند. رابطه k_v و θ_{cs} به صورت زیر می‌باشد:

$$k_{cs} = \frac{k_v}{k_z} \quad (21)$$

در رابطه (۲۱)، k_z برابر با نسبت امپدانس مؤلفه منفی به مثبت می‌باشد ($k_z = |Z_n/Z_p|$). همچنین، از رابطه (۲۱) نتیجه می‌شود که $\frac{1}{k_z}$ حساسیت k_{cs} نسبت به k_v بوده و چون مقدار امپدانس مؤلفه مثبت ماشین معمولاً خیلی بزرگ‌تر از امپدانس مؤلفه منفی می‌باشد، این حساسیت مقدار بزرگی خواهد داشت.

همچنین، CUFR^۲ که برای سنجش میزان نامتعادلی جریان روتور به کار می‌رود برابر با نسبت مؤلفه منفی به

² Complex Current Unbalance Factor for rotor

¹ Complex Current Unbalance Factor for stator

$$S_i = V_{sp} I_{sp}^* + V_{sn} I_{sn}^* \quad (۴۱)$$

$$P_i = \text{Re}(S_i) \quad (۴۲)$$

$$Q_i = \text{Im}(S_i) \quad (۴۳)$$

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_i} \times 100 \quad (۴۴)$$

$$pf = \cos \left(\tan^{-1} \frac{Q_i}{P_i} \right) \quad (۴۵)$$

توجه شود که در روابط (۳۷) تا (۴۰) اندازه جریان‌ها مدنظر است.

در شرایط نامتعادل، موتور به گونه بارگذاری می‌شود که جریان‌ها از مقدار نامی تجاوز نکنند. از تقسیم توان خروجی ماشین در شرایط نامتعادل به توان خروجی ماشین در شرایط متعادل شاخصی به نام (Derating Factor) محاسبه می‌گردد.

گشتاور الکترومغناطیسی منتجه موتور القایی در شرایط نامتعادل بر اساس گشتاورهای مؤلفه مثبت و منفی به صورت رابطه (۴۶) از تفاضل گشتاور مؤلفه منفی T_n از گشتاور مؤلفه مثبت T_p محاسبه می‌گردد.

$$T = T_p - T_n = \frac{3R_r}{\omega_s} \left(\frac{I_{rp}^2}{S} - \frac{I_{rn}^2}{2-S} \right) \quad (۴۶)$$

به عنوان یادآوری مقادیر مدار معادل تونن موتور القایی، روابط (۴۷) تا (۴۹) به صورت زیر ارائه می‌گردند:

$$Z_{th} = R_{th} + jX_{th} = jX_m \parallel (R_s + jX_s) \quad (۴۷)$$

$$V_{pth} = \frac{jX_m^* V_p}{R_s + j(X_s + X_m)} \quad (۴۸)$$

$$V_{nth} = \frac{jX_m^* V_n}{R_s + j(X_s + X_m)} \quad (۴۹)$$

گشتاور را بر اساس روابط (۴۶) تا (۴۹) به صورت زیر بازنویسی می‌کنیم:

$$T = \frac{3R_r^* V_{pth}^2}{S \omega_s \left\{ \left(R_{th} + \frac{R_r}{S} \right)^2 + (X_{th} + X_r)^2 \right\}} - \frac{3R_r^* V_{nth}^2}{(2-S) \omega_s \left\{ \left(R_{th} + \frac{R_r}{2-S} \right)^2 + (X_{th} + X_r)^2 \right\}} \quad (۵۰)$$

بنابراین گشتاور به عنوان تابعی از CVUF به صورت روابط (۵۱) و (۵۲) ارائه می‌گردد.

$$I_{max} = \max(I_a, I_b, I_c) \quad (۳۳)$$

بر اساس روابط (۲۶) تا (۲۸) محدوده تغییرات حداکثر جریان‌های استاتور به صورت زیر می‌باشد:

$$I_{ps} \sqrt{1+k_c+k_c^2} \leq I_{max} \leq I_{ps} (1+k_c) \quad (۳۴)$$

حد بالای رابطه فوق (بدترین حالت) زمانی حاصل می‌گردد که θ_v برابر با زاویه زیر باشد:

$$\hat{\theta}_v = \varphi_n - \varphi_p + 2n\pi/3 \quad (۳۵)$$

لازم به ذکر است که $n=1, 2, 3$ به ترتیب متناظر با حداکثر مقدار ممکن I_{max} برای فازهای a و b و c می‌باشد. همچنین حد پایین رابطه فوق (مطلوب‌ترین حالت) زمانی حاصل می‌گردد که θ_v برابر با زاویه زیر باشد:

$$\bar{\theta}_v = \varphi_n - \varphi_p + 2n\pi/3 \pm \pi \quad (۳۶)$$

لازم به ذکر است که در رابطه (۳۶) نیز $n=1, 2, 3$ به ترتیب متناظر با حداقل مقدار ممکن I_{max} برای فازهای a و b و c می‌باشد.

به منظور عدم تجاوز I_{max} از محدوده مجاز (برای جلوگیری از گرم شدن ماشین)، لغزش باید به مقدار معینی محدود گردد. حداکثر میزان لغزش به گونه‌ای که حداکثر جریان موتور برابر با مقدار نامی گردد، حداکثر لغزش مجاز ماشین (Maximum Allowable Slip) نامیده می‌شود. حداکثر لغزش مجاز می‌تواند بر اساس مقادیر k_v و θ_v و با استفاده از مدار معادل ماشین القایی محاسبه گردد.

بعضی از مشخصه‌های ماشین از جمله تلفات مسی استاتور (P_{sta_Loss})، تلفات مسی روتور (P_{rot_Loss})، توان خروجی (P_{out})، گشتاور خروجی (T_{out})، توان مختلط ورودی (S_i)، توان ورودی (P_{in})، توان راکتیو ورودی (Q_{in})، بازده (η) و ضریب قدرت (PF) طبق روابط (۳۷) تا (۴۵) محاسبه می‌شوند.

$$P_{sta_Loss} = 3R_s I_{sp}^2 + 3R_s I_{sn}^2 = 3R_s I_{sp}^2 (1+k_{cs}^2) \quad (۳۷)$$

$$P_{rot_Loss} = 3R_r I_{rp}^2 + 3R_r I_{rn}^2 = 3R_r I_{rp}^2 (1+k_{cr}^2) \quad (۳۸)$$

$$P_{out} = 3R_r I_{rp}^2 \left[\left(\frac{1}{s} - 1 \right) + k_{cr}^2 \left(\frac{1}{2-s} - 1 \right) \right] \quad (۳۹)$$

$$T_{out} = \frac{3R_r I_{rp}^2}{\omega_s} \left[\frac{1}{s} - \frac{k_{cr}^2}{2-s} \right] \quad (۴۰)$$

$$T = \frac{3R_r * I_{rp}^2}{\omega_s} \left(\frac{1}{S} - \frac{\left(K_{cs} * \frac{X_n}{X_p} \right)^2 * \cos 2\theta_{cs}}{2-S} \right) \quad (60)$$

گشتاور با استفاده از روابط (۴۶) و (۵۵) و (۵۶) به صورت رابطه (۶۱) بازنویسی می‌شود:

$$T = \frac{3R_r}{\omega_s} \left(\frac{1}{S} \left(\frac{V_{sp}}{Z_{sp}} * X_p \right)^2 - \frac{1}{2-S} \left(\frac{V_{sn}}{Z_{sn}} * X_n \right)^2 \right) \quad (61)$$

با توجه به رابطه (۶۲) در نهایت گشتاور بر اساس IUF از رابطه (۶۳) به دست می‌آید:

$$IUF = \frac{Z_{sn}}{Z_{sp}} = K_z \angle \theta_z \quad (62)$$

$$T = \frac{3R_r}{\omega_s * Z_{sp}^2} \left(\frac{1}{S} (V_p * X_p)^2 - \left(\frac{V_n}{K_z} * X_n \right)^2 * \frac{\sec 2\theta_z}{2-S} \right) \quad (63)$$

۳- تحلیل عملکرد موتورهای القایی کوپل شده

مقادیر قدرت نامی موتورهای القایی مورد استفاده در صنعت بر اساس مقادیر بار آنها انتخاب می‌گردد. با افزایش بار موتور و عدم توانایی موتور در برآوردن بار و با توجه به اینکه جایگزین کردن با موتور بزرگ‌تر مستلزم صرف هزینه زیادی می‌باشد، یک راه حل مناسب کوپل کردن موتورهای القایی بر روی یک شفت می‌باشد. در این مقاله، عملکرد دو موتور القایی که به منظور افزایش قدرت نامی کوپل شده‌اند، در شرایط متعادل و نامتعادل مورد مطالعه قرار می‌گیرد. فرض بر این است که دو موتور بر روی یک شفت کوپل شده‌اند و بار یکسانی را در زمان یکسانی می‌چرخانند. کوپل کردن می‌تواند عملکرد موتور را در شرایط نامتعادل نسبت به استفاده از یک موتور بزرگ با قدرت برابر با مجموع دو موتور بهبود بدهد.

۳-۱- تحلیل عملکرد موتورهای کوپل شده در شرایط

ماندگار

گشتاور معادل موتورهای کوپل شده برابر با مجموع گشتاورهای هر کدام از موتورها می‌باشد با فرض برابری مقاومت روتور در دو موتور، گشتاور معادل از رابطه (۶۴) به دست می‌آید:

$$T = \frac{3R_r * V_{pth}^2}{\omega_s} \left[\frac{1}{S \left\{ \left(R_{th} + \frac{R_r}{S} \right)^2 + (X_{th} + X_r)^2 \right\}} - \frac{(K_v \angle \theta_v)^2}{(2-S) \left\{ \left(R_{th} + \frac{R_r}{2-S} \right)^2 + (X_{th} + X_r)^2 \right\}} \right] \quad (51)$$

$$T = \frac{3R_r * V_{pth}^2}{\omega_s} \left[\frac{1}{S \left\{ \left(R_{th} + \frac{R_r}{S} \right)^2 + (X_{th} + X_r)^2 \right\}} - \frac{K_v^2 * \cos 2\theta_v}{(2-S) \left\{ \left(R_{th} + \frac{R_r}{2-S} \right)^2 + (X_{th} + X_r)^2 \right\}} \right] \quad (52)$$

گشتاور به عنوان تابعی از CUFR بر اساس روابط (۵۳) و (۵۴) به دست می‌آید:

$$T = \frac{3R_r * I_{rp}^2}{\omega_s} \left(\frac{1}{S} - \frac{(K_{cr} \angle \theta_{cr})^2}{2-S} \right) \quad (53)$$

$$T = \frac{3R_r * I_{rp}^2}{\omega_s} \left(\frac{1}{S} - \frac{K_{cr}^2 * \cos 2\theta_{cr}}{2-S} \right) \quad (54)$$

مؤلفه‌های مثبت و منفی جریان روتور بر اساس جریان استاتور از روابط (۵۵) و (۵۶) حاصل می‌گردند:

$$I_{rp} = I_{sp} * X_p \quad (55)$$

$$I_{rn} = I_{sn} * X_n \quad (56)$$

پارامترهای X_n و X_p در روابط (۵۵) و (۵۶) به ترتیب از روابط (۵۷) و (۵۸) به دست می‌آیند:

$$X_p = \frac{jX_m}{\frac{R_r}{S} + j(X_m + X_r)} \quad (57)$$

$$X_n = \frac{jX_m}{\frac{R_r}{2-S} + j(X_m + X_r)} \quad (58)$$

بنابراین، از تقسیم معادله (۵۶) بر معادله (۵۵) رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$K_{cr} = K_{cs} * \frac{X_n}{X_p} \quad (59)$$

بنابراین، گشتاور به عنوان تابعی از CUFS با استفاده از رابطه (۶۰) به دست می‌آید:

یادآور می‌شود، در روابط فوق، s_p برابر با لغزش در توالی مثبت بوده و برابر با s می‌باشد در حالی که s_n لغزش در توالی منفی بوده و برابر با $2 - s$ می‌باشد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، نتایج بررسی عددی (شبیه‌سازی) ارائه می‌شود تا مطالعات انجام گرفته در بخش‌های قبلی مورد تأیید قرار گیرند. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است که در آن مدل موتور القایی که در بخش‌های قبلی ارائه شد و مطالعات انجام شده به صورت کد برنامه‌نویسی درآمده و سناریوهای مختلفی به اجرا درآمده است. در حقیقت معادلات نوشته شده در بخش قبلی به صورت کد برنامه‌نویسی نوشته شده و در سناریوهای مختلف اجرا شده است.

۴-۱- مقایسه تعریف نامتعادلی ولتاژ NEMA و IEC

به منظور درک بهتر دو تعریف متفاوت نامتعادلی ولتاژ NEMA و IEC، در این قسمت یک بررسی عددی انجام می‌شود. فرض می‌شود ولتاژهای خط به صورت زیر در نظر گرفته شوند.

$$\bar{U}_a = U_a \angle 0^\circ, \quad \bar{U}_b = U_b \angle \theta_b, \quad \bar{U}_c = U_c \angle \theta_c \quad (75)$$

مثلاً به ازای ۵٪ نامتعادلی بر اساس تعریف NEMA و با فرض کردن میانگین ولتاژ برابر با ۴۰۵ ولت و نیز در نظر گرفتن U_a به عنوان ولتاژی که حداکثر اختلاف را با میانگین ولتاژها دارد، می‌توان نوشت:

$$\frac{U_a - \text{average}}{\text{average}} = 0.05 \Rightarrow U_a = 425.25v \quad (76)$$

$$\frac{U_a + U_b + U_c}{3} = 405 \Rightarrow U_b + U_c = 789.75 \quad (77)$$

انتخاب U_a به عنوان ولتاژ دارای بیشترین انحراف از میانگین ایجاب می‌کند که دو قید زیر در نظر گرفته شوند:

$$|U_b - 405| \angle 20.25, \quad |U_c - 405| \angle 20.25 \quad (78)$$

با توجه به صفر بودن مجموع ولتاژهای خط که به معادله مختلط زیر منجر می‌شود (شامل دو معادله می‌باشد) و با مشخص نمودن U_b می‌توان از حل دو معادله دو مجهولی غیرخطی مقادیر θ_b و θ_c را به دست آورد:

$$\begin{aligned} \bar{U}_a + \bar{U}_b + \bar{U}_c &= 0 \\ \Rightarrow 425.25 + U_b \cos \theta_b + U_b \sin \theta_b j \\ &+ (789.75 - U_b) \cos \theta_b \\ &+ (789.75 - U_b) \sin \theta_b j = 0 \end{aligned} \quad (79)$$

$$\begin{aligned} T_{cas} &= T_1 + T_2 = \frac{3R_{r1} * I_{r1}^2}{S\omega_s} + \frac{3R_{r2} * I_{r2}^2}{S\omega_s} \\ &= \frac{3R_r}{S\omega_s} (I_{r1}^2 + I_{r2}^2) \end{aligned} \quad (64)$$

توان خروجی و ورودی مجموعه نیز به ترتیب از روابط (۶۵) و (۶۶) به دست می‌آیند:

$$P_{out\ cas} = P_{out1} + P_{out2} \quad (65)$$

$$P_{in\ cas} = P_{in1} + P_{in2} \quad (66)$$

بازده موتورهای کوپل شده به صورت رابطه (۶۷) می‌باشد:

$$\eta_{cas} = \frac{P_{out\ cas}}{P_{in\ cas}} = \frac{P_{out1} + P_{out2}}{P_{in1} + P_{in2}} * 100 \quad (67)$$

تلفات استاتور و روتور در مجموعه کوپل شده برابر با مجموع تلفات هر کدام از موتورها می‌باشد:

$$\begin{aligned} P_{sta\ Loss\ cas} &= P_{sta\ Loss1} + P_{sta\ Loss2} \\ &= 3R_{s1} I_1^2 + 3R_{s2} I_2^2 \end{aligned} \quad (68)$$

$$\begin{aligned} P_{rot\ Loss\ cas} &= P_{rot\ Loss1} + P_{rot\ Loss2} \\ &= 3R_{r1} I_{r1}^2 + 3R_{r2} I_{r2}^2 \end{aligned} \quad (69)$$

تلفات کل نیز برابر مجموع تلفات استاتور و روتور می‌باشد:

$$P_{Loss\ cas} = P_{sta\ Loss\ cas} + P_{rot\ Loss\ cas} \quad (70)$$

۳-۲- تحلیل عملکرد موتورهای کوپل شده در شرایط نامتعادل

با توجه به وجود شرایط نامتعادل، گشتاور موتور اول برابر است با:

$$T_1 = T_{p1} - T_{n1} = \frac{3R_{r1} * I_{p1}^2}{S\omega_s} - \frac{3R_{r1} * I_{n1}^2}{(2-S)\omega_s} \quad (71)$$

همچنین، گشتاور موتور دوم برابر است با:

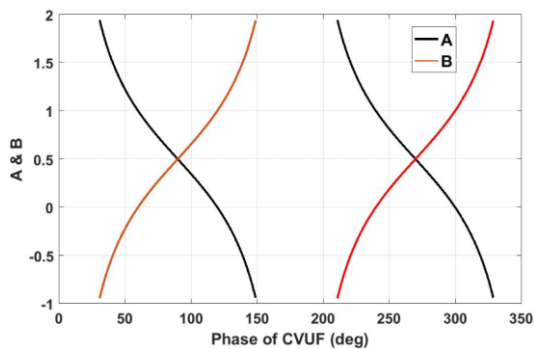
$$T_2 = T_{p2} - T_{n2} = \frac{3R_{r2} * I_{p2}^2}{S\omega_s} - \frac{3R_{r2} * I_{n2}^2}{(2-S)\omega_s} \quad (72)$$

با فرض برابری مقاومت روتور در دو موتور، گشتاور مجموعه موتورها برابر است با:

$$T_{cas} = \frac{3R_r}{\omega_s} \left\{ \frac{1}{S} (I_{p1}^2 + I_{p2}^2) - \frac{1}{2-S} (I_{n1}^2 + I_{n2}^2) \right\} \quad (73)$$

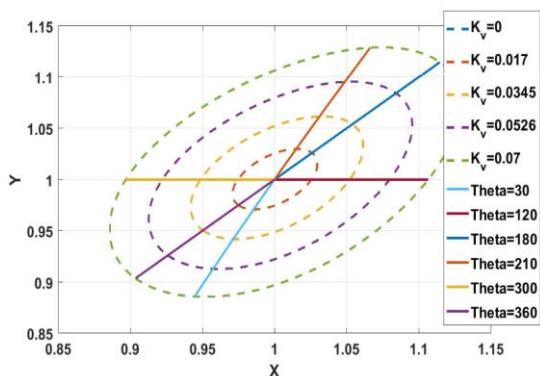
$$T_{cas} = \frac{3R_r}{\omega_s} \left\{ \frac{1}{S_p} (I_{p1}^2 + I_{p2}^2) - \frac{1}{S_n} (I_{n1}^2 + I_{n2}^2) \right\} \quad (74)$$

تغییرات زاویه شاخص نامتعادلی از ۰ تا ۳۶۰ درجه را نشان می‌دهد که با توجه به آن، تأثیر زاویه شاخص نامتعادلی بر الگوی ولتاژ مشهود می‌باشد. شکل (۴) تأثیر دامنه و فاز شاخص نامتعادلی را بر مقادیر X و Y (به دست آمده از روابط (۱۳) تا (۱۵)) نشان می‌دهد. در شکل (۴) بیضی‌ها تغییرات X و Y را در برابر تغییر زاویه نامتعادلی به ازای مقدار ثابت دامنه نامتعادلی نشان می‌دهند. با توجه به این تغییرات، تأثیر زاویه نامتعادلی در برابر شاخص نامتعادلی و دامنه ولتاژها مشخص می‌گردد. همچنین خطوط راست تغییرات X و Y را در برابر تغییرات دامنه نامتعادلی به ازای مقدار ثابت زاویه نامتعادلی نشان می‌دهند. با در اختیار داشتن دامنه‌های ولتاژهای خط می‌توان به راحتی X و Y را از رابطه (۱۳) به دست آورده و سپس از روی شکل (۴) دامنه و زاویه شاخص نامتعادلی ولتاژ را به دست آورد.



شکل ۳- تغییرات A و B بر اساس تغییر زاویه نامتعادلی ولتاژ

بنابراین، غیردقیق بودن تحلیل عملکرد موتور در شرایط نامتعادل تنها با استفاده از دامنه نامتعادلی بدون لحاظ نمودن زاویه نامتعادلی بدیهی می‌باشد. به عنوان مثال اگر فقط مقدار دامنه شاخص نامتعادلی لحاظ گردد نمی‌توان تخمین دقیقی از میزان نامتعادلی ولتاژ به دست آورد زیرا در یک دامنه ثابت، به ازای مقادیر مختلف زاویه نامتعادلی، X و Y در یک محدوده قابل توجه تغییر می‌کنند.



شکل ۴- نمودار CVUF

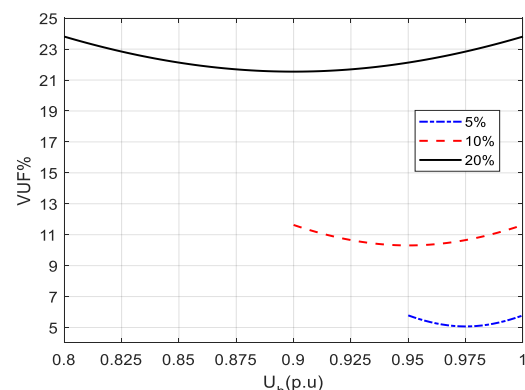
بنابراین مقدار نامتعادلی حاصل از تعریف IEC یا به عبارتی VUF برابر خواهد بود با:

$$VUF = \frac{|\bar{U}_n|}{|\bar{U}_p|} \times 100 \quad (80)$$

$$= \frac{|425.25\angle 0^\circ + a^2 U_b \angle \theta_b + a(789.75 - U_b)\angle \theta_c|}{|425.25\angle 0^\circ + a U_b \angle \theta_b + a^2(789.75 - U_b)\angle \theta_c|} \times 100$$

بر اساس معادله فوق مشخص می‌گردد که به ازای یک مقدار نامتعادلی بر اساس تعریف NEMA یک محدوده از مقادیر نامتعادلی بر اساس تعریف IEC با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای U_b حاصل می‌گردد. این مطلب در منحنی‌های شکل (۲) که به ازای ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ از شاخص نامتعادلی NEMA ترسیم شده‌اند، نشان داده شده است. در این شکل‌ها محور افقی مقادیر اندازه U_b را بر اساس پربونیت نشان می‌دهد و محور عمودی نیز مقدار نامتعادلی بر اساس رابطه (۸۰) می‌باشد.

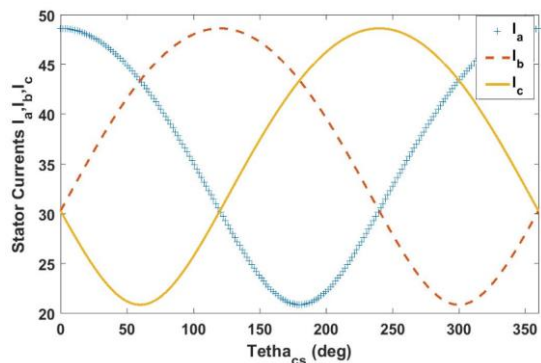
همان‌گونه که در شکل (۲) ملاحظه می‌شود به ازای ۵٪ نامتعادلی بر اساس تعریف NEMA نسبت ولتاژ مؤلفه منفی به مثبت تقریباً بین ۵/۱ تا ۵/۸ درصد تغییر می‌کند. به همین ترتیب به ازای ۱۰٪ و ۲۰٪ نامتعادلی تعریف NEMA این نسبت به ترتیب بین ۱۰/۳ تا ۱۱/۶ و بین ۲۱/۵ تا ۲۳/۸ درصد تغییر می‌کند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار نامتعادلی بر اساس تعریف NEMA، هم میزان نامتعادلی بر اساس تعریف IEC و هم بازه تغییرات آن در برابر تغییرات اندازه U_b افزایش می‌یابد. همچنین، مشاهده می‌شود که هرچه درصد نامتعادلی در تعریف NEMA افزایش می‌یابد اختلاف درصد نامتعادلی بر اساس دو تعریف IEC و NEMA نیز افزایش می‌یابد.



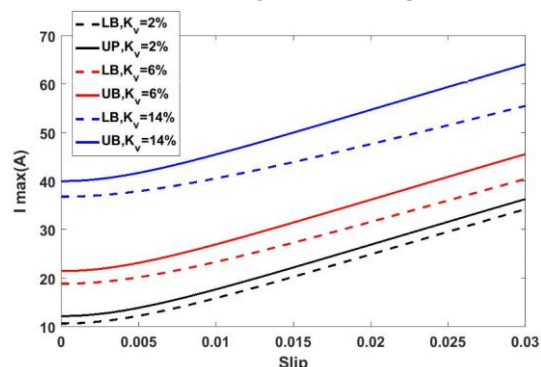
شکل ۲- ارتباط میان تعاریف IEC و NEMA به ازای ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ نامتعادلی از تعریف NEMA

۴-۲- الگوی ولتاژ در شرایط نامتعادل

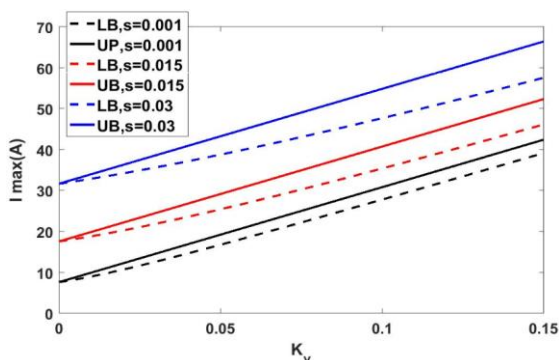
شکل (۳) تغییرات A و B از روابط (۱۰) تا (۱۲) را در برابر



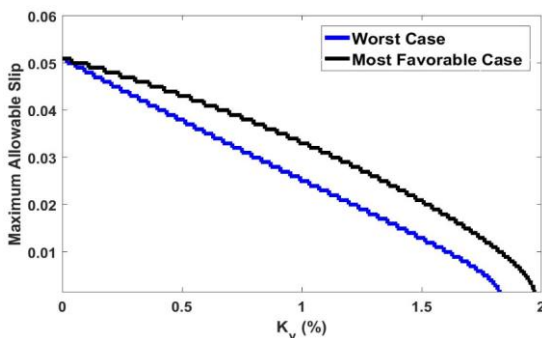
شکل ۵- تغییرات جریان‌های استاتور به‌عنوان تابعی از θ_{cs} به ازای $k_v = 6\%$ و $s = 3.3\%$



شکل ۶- محدوده تغییرات I_{max} در برابر تغییرات لغزش به ازای چندین مقدار متفاوت k_v



شکل ۷- تغییرات I_{max} در برابر k_v به ازای چندین مقدار متفاوت لغزش



شکل ۸- تغییرات حداکثر لغزش مجاز در برابر k_v به ازای $\theta_v = \bar{\theta}_v$ (مطلوب‌ترین حالت) و $\theta_v = \hat{\theta}_v$ (بدترین حالت)

۳-۴- تحلیل عملکرد موتور در شرایط نامتعادل

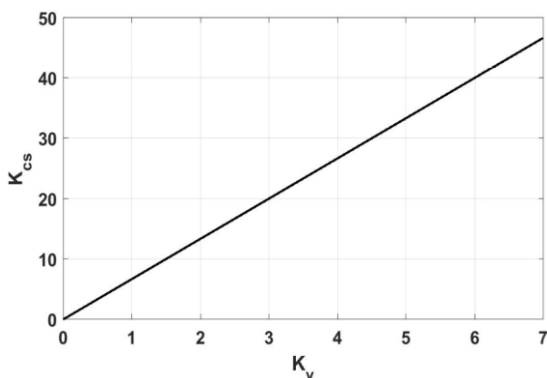
به‌منظور بررسی تأثیر زاویه CCUF بر اندازه جریان‌های استاتور، شکل (۵) بر اساس روابط (۲۶) تا (۲۸) و به ازای سرعت استاتور برابر با ۱۷۴۰ دور در دقیقه (rpm) و میزان نامتعادلی ولتاژ برابر با ۶٪ به‌دست می‌آید. همچنین ولتاژ ترتیب مثبت ثابت و برابر با ۲۳۰٫۹۴ ولت با فاز صفر فرض شده است. در این شکل، حدفاصل میان نقاط پیک و نقاط بالایی تلاقی نمودارها محدوده تغییرات I_{max} را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۵) مشهود می‌باشد، جریان‌های استاتور در برابر تغییرات θ_{cs} و به عبارتی در برابر تغییرات θ_v به‌طور قابل‌توجهی تغییر می‌کنند.

همچنین محدوده تغییرات I_{max} به ازای چندین مقدار متفاوت k_v و در برابر تغییرات لغزش در شکل (۶) و همچنین محدوده تغییرات آن در برابر چندین مقدار متفاوت لغزش و در برابر تغییرات k_v در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشهود می‌باشد ΔI_{max} وابستگی زیادی به k_v دارد. همچنین، به ازای یک مقدار ثابت k_v ، حد بالا و پایین I_{max} وابسته به θ_v می‌باشد. با توجه به اینکه θ_v در یک فیدر توزیع تا حدی غیرقابل پیش‌بینی می‌باشد، یک معیار تعیین وضعیت موتور و طراحی سیستم حفاظتی در نظر گرفتن بدترین حالت می‌باشد. حد بالای منحنی‌ها در شکل‌های (۶) و (۷) نشان‌دهنده بدترین حالت می‌باشد که متناظر با حداکثر جریان ممکن برای استاتور به ازای سطح مشخصی از نامتعادلی ولتاژ می‌باشد. حداکثر لغزش مجاز یعنی میزانی از لغزش که به ازای آن I_{max} برابر با جریان نامی موتور خواهد بود، در شکل (۸) در برابر تغییرات k_v نشان داده شده است. در این مطالعه جریان نامی برابر با ۵۰ آمپر فرض شده است. شکل (۸) نشان می‌دهد که حداکثر لغزش مجاز میان حد بالا (به ازای $\theta_v = \bar{\theta}_v$) و حد پایین (به ازای $\theta_v = \hat{\theta}_v$) تغییر می‌کند.

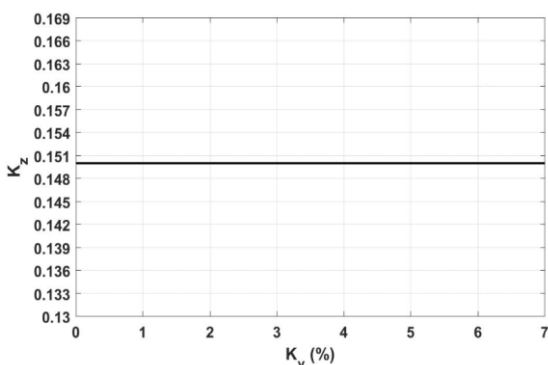
تغییرات شاخص تنزل متناظر با حداکثر لغزش مجاز نسبت به تغییرات k_v در شکل (۹) نمایش داده شده است. این شکل به‌وضوح نشان می‌دهد که شاخص تنزل نیز میان حد بالا (به ازای $\theta_v = \bar{\theta}_v$) و حد پایین (به ازای $\theta_v = \hat{\theta}_v$) تغییر می‌کند. لازم به ذکر است که بدترین حالت باید به منظور جلوگیری از گرم شدن موتور القایی که تحت شرایط نامتعادل کار می‌کند در نظر گرفته‌شود.

بنابراین با توجه به تأثیر پارامترهای ماشین بر نامتعادلی جریان، اهمیت شاخص نامتعادلی جریان مشخص می‌شود. شکل (۱۱) ارتباط میان k_z و k_v را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است تغییر k_v تأثیری بر k_z ندارد.

شاخص نامتعادلی جریان، یکی از دقیق‌ترین شاخص‌ها برای تخمین عملکرد موتور در شرایط نامتعادل می‌باشد. شکل (۱۲) مشخصه گشتاور-سرعت یک موتور القایی ۵۰ اسب بخاری را به ازای مقادیر مختلف دامنه CUFR نشان می‌دهد و می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دامنه نامتعادلی، گشتاور راه‌اندازی و گشتاور حداکثر کاهش می‌یابند. طبق استاندارد NEMA، میزان افزایش دمای موتور تقریباً دو برابر مجذور نامتعادلی ولتاژ می‌باشد.

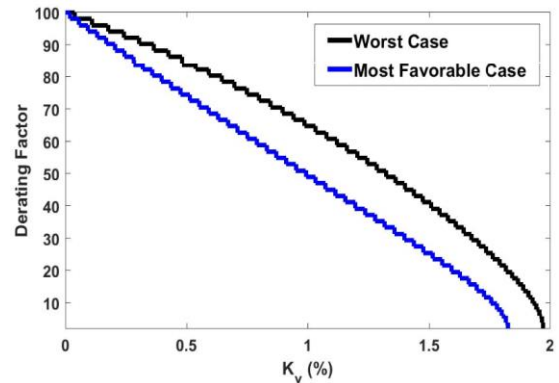


شکل ۱۰- تغییرات دامنه CUFR در برابر k_v (%)



شکل ۱۱- تغییرات k_z در برابر k_v (%)

لازم به ذکر است وجود گشتاور مؤلفه منفی (T_n) با کاهش گشتاور، زمان راه‌اندازی را افزایش داده و به عملکرد با لغزش بالاتر منجر می‌گردد. علت پدید آمدن گشتاور مؤلفه منفی شاری است که به علت وجود مؤلفه منفی ولتاژ، در فاصله هوایی به وجود می‌آید و جهت این شار برخلاف جهت چرخش روتور می‌باشد که موجب تولید مؤلفه منفی و نامطلوب گشتاور می‌گردد.



شکل ۹- تغییرات شاخص تنزل در برابر k_v به ازای $\theta_v = \bar{\theta}_v$ (مطلوب‌ترین حالت) و $\theta_v = \hat{\theta}_v$ (بدترین حالت)

حال بر روی شبیه‌سازی و به دست آوردن شاخص‌های نامتعادلی و کمیت‌های اصلی موتور القایی متمرکز می‌شود. در این شبیه‌سازی، مقادیر به کار گرفته شده برای پارامترهای موتور در شبیه‌سازی مطابق جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱- پارامترهای موتورهای القایی

پارامتر	موتور ۵۰ اسب بخار	موتور ۲۵ اسب بخار
R_1	۰/۴۴۲ اهم	۰/۵۴۱ اهم
R_2	۰/۲۱۰ اهم	۰/۳۳۲ اهم
X_1	۰/۴۲۰ اهم	۰/۷۲۳ اهم
X_2	۰/۴۲۰ اهم	۰/۷۱۰ اهم
X_m	۳۰ اهم	۲۶/۳ اهم
P (قطب)	۴	۴
V_1	۲۳۰/۹۴ ولت	۲۳۰/۹۴ ولت
F	۶۰ هرتز	۶۰ هرتز
تلفات مکانیکی	۱۵۰ وات	۱۲۵ وات
تلفات هسته	۱۱۰۰ وات	۴۵۰ وات

در شکل (۱۰) تغییرات دامنه شاخص نامتعادلی جریان استاتور در برابر دامنه نامتعادلی ولتاژ نشان‌دهنده تأثیر بالای نامتعادلی ولتاژ بر نامتعادلی جریان استاتور می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشهود است یک مقدار کوچک افزایش در نامتعادلی ولتاژ به درصد بالایی از نامتعادلی جریان منتهی می‌گردد که متعاقباً تأثیر زیادی بر کمیت‌های خروجی ماشین می‌گذارد. حساسیت بالای k_{cs} نسبت به k_v از رابطه (۲۱) و کوچک بودن k_z در حدود مقدار ثابت ۰/۱۵ (در شرایط لغزش ۳/۳٪) به علت کوچک بودن امیدانس مؤلفه منفی نسبت به امیدانس مؤلفه مثبت ناشی می‌گردد. در نتیجه درصد کوچکی از نامتعادلی ولتاژ می‌تواند موجب افزایش بیش از حد جریان شده و به سوختن موتور منجر شود.

امپدانس برابر با ۰,۱۵ می باشد، ۳٪ نامتعادلی در ولتاژ ورودی منجر به حدود ۲۰٪ نامتعادلی در جریان استاتور می گردد. نتایج مربوط به این بررسی موردی در موتور ۵۰ اسب بخاری در جدول ۲ خلاصه گردیده است. با توجه به نتایج به دست آمده، تاثیر نامطلوب نامتعادلی بر کمیت های اساسی موتور القایی به اثبات می رسد.

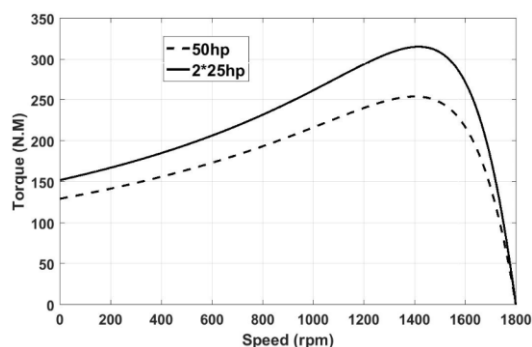
جدول ۲- مقایسه کمیت های خروجی موتور در شرایط متعادل و نامتعادل

شرایط نامتعادل ($K_{CS} = 20\%$)	شرایط متعادل	کمیت
۷,۰۷	۳,۹۱	تلفات (KW)
۱۷,۵۴	۲۰,۵۹	توان خروجی (KW)
٪۷۱,۲۷	٪۸۴,۰۴	بازده
۱۲۰,۳	۱۵۵,۴	گشتاور راه اندازی (Nm)
۲۳۹,۱	۳۰۰,۴	گشتاور حداکثر (Nm)

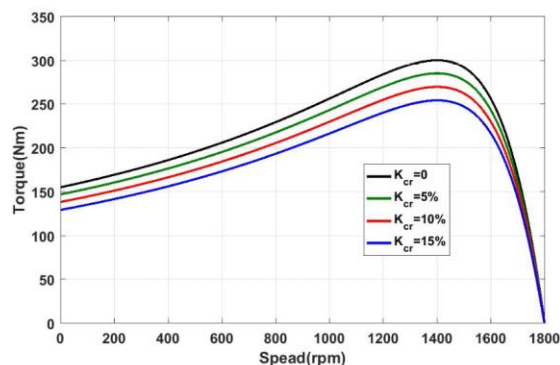
۴-۵- مقایسه عملکرد یک موتور با دو موتور کوپل

شده با قدرت معادل در شرایط نامتعادل

در شکل (۱۴) مشخصه گشتاور-سرعت دو موتور متصل شده که قدرت هر کدام ۲۵ اسب بخار می باشد با مشخصه یک موتور ۵۰ اسب بخاری مقایسه شده و بهبود عملکرد با اتصال موتورهای کوچک به جای یک موتور متعادل بزرگ اثبات می گردد. به عنوان مثال، با اتصال دو موتور کوچک به یکدیگر، به ازای ۱۵ درصد نامتعادلی و در شرایط یکسان از نظر توان، گشتاور حداکثر از حدود ۲۵۴ به ۳۱۵ نیوتون-متر و گشتاور راه اندازی از حدود ۱۳۰ به ۱۵۲ نیوتون-متر افزایش می یابد. بنابراین، با وجود اتصال آبخاری، گشتاور حداکثر حدود ۲۴٪ و گشتاور راه اندازی حدود ۱۷٪ افزایش می یابد. همان طور که در شکل (۱۴) ملاحظه می شود گشتاور ماکزیمم به ازای سرعت در حدود ۱۴۰۰ دور در دقیقه به دست می آید.

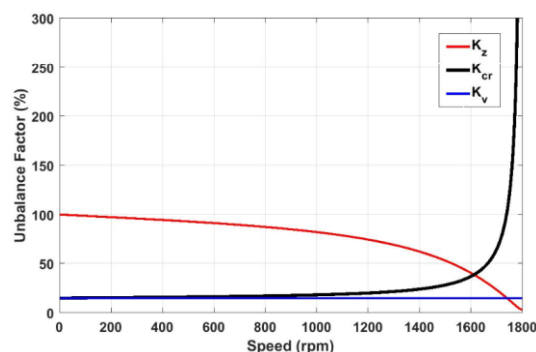


شکل ۱۴- مقایسه مشخصه گشتاور-سرعت یک موتور القایی ۵۰ اسب بخاری با دو موتور القایی ۲۵ اسب بخاری کوپل شده



شکل ۱۲- مشخصه گشتاور-سرعت موتور ۵۰ اسب بخاری به ازای مقادیر مختلف k_{cr}

در شکل (۱۳)، به منظور مقایسه شاخص های نامتعادلی ذکر شده، منحنی تغییرات سه شاخص CVUF، CUFR و IUF در برابر تغییرات سرعت نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۳)، با تغییر سرعت موتور k_z دچار تغییرات کمی می شود در حالی که با تغییر سرعت، k_v ثابت می ماند. همچنین با توجه به اینکه می دانیم k_z در مخرج رابطه k_{cr} قرار دارد با میل کردن k_z به صفر، k_{cr} به بی نهایت میل می کند. بنابراین، k_{cr} تأثیر بیشتری از تغییر سرعت می پذیرد.



شکل ۱۳- مقایسه تغییرات شاخص های نامتعادلی در برابر سرعت

۴-۴- بررسی موردی مقایسه کمیت های خروجی

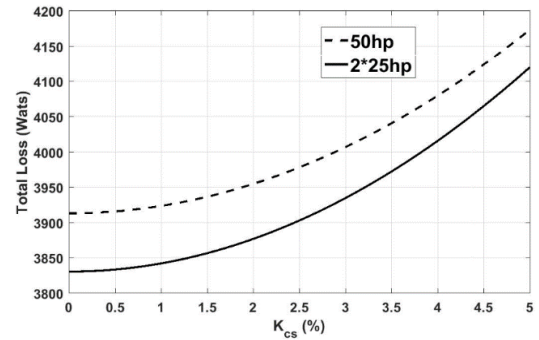
موتور در شرایط متعادل و نامتعادل

در این قسمت به منظور مقایسه روشن تر، در شرایط سرعت ۱۷۴۰ دور در دقیقه (معادل با لغزش حدود ۳,۳٪) به بررسی تاثیر شرایط ناپایداری بر تعدادی از کمیت های اساسی موتور از جمله توان خروجی، تلفات، بازده، گشتاور راه اندازی و گشتاور حداکثر می پردازیم. در این بررسی موردی شاخص نامتعادلی جریان استاتور برابر با ۲۰٪ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر می باشد با توجه به اینکه در شرایط لغزش ۳,۳ درصدی، مقدار شاخص نامتعادلی

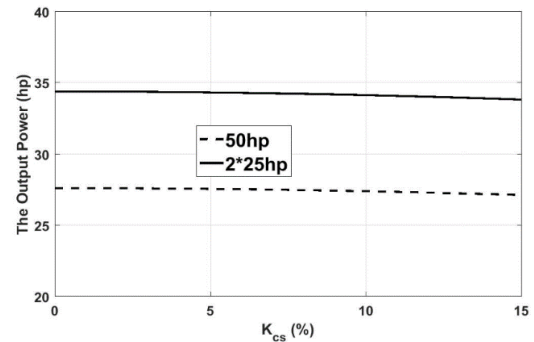
تغییرات مهم‌ترین مشخصات موتور القایی یعنی تلفات، توان خروجی و بازده برای موتور القایی ۵۰ اسب بخاری در مقایسه با دو موتور القایی ۲۵ اسب بخاری کوپل شده در برابر تغییرات شاخص جریان مختلط استاتور به ترتیب در شکل‌های (۱۵) تا (۱۷) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها به وضوح ملاحظه می‌شود، با کوپل کردن موتورهای تلفات کاهش، توان خروجی افزایش و بازده افزایش می‌یابد. پر واضح است که با افزایش نامتعادلی جریان، تلفات افزایش، توان خروجی کاهش و بازده نیز کاهش می‌یابد. بنابراین با کوپل کردن موتورهای در شرایط نامتعادل، عملکرد موتور در حالت عادی یا ماندگار بهبود می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری

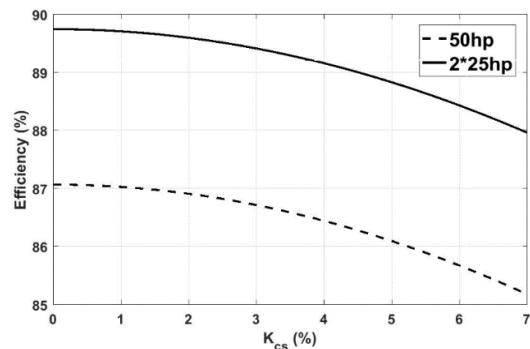
استانداردهای بین‌المللی IEC و NEMA با در نظر گرفتن دامنه نامتعادلی ولتاژ و نادیده گرفتن زاویه نامتعادلی دارای تخمین دقیقی از شرایط نامتعادلی نیستند. شاخص‌هایی چون CVUF نیز به علت در نظر نگرفتن پارامترهای ماشین دارای ضعف‌هایی در تحلیل نامتعادلی می‌باشد. بنابراین با ترکیب CVUF با IUF شاخص جامع‌تر و دقیق‌تری تحت عنوان CCUF به دست می‌آید که علاوه بر دامنه و زاویه نامتعادلی ولتاژ، پارامترهای ماشین را نیز وارد تحلیل می‌نماید. این مقاله به منظور اثبات تخمین دقیق خروجی موتور القایی با استفاده از CCUF، بر مقایسه عملکرد دو موتور با اتصال آبشاری با یک موتور بزرگ معادل با آن‌ها در شرایط نامتعادل متمرکز شده است. در نهایت، تحلیل دقیق‌تر شرایط نامتعادل با استفاده از شاخص CCUF و بهبود عملکرد موتور در حالت استفاده از چند موتور با اتصال آبشاری به جای یک موتور بزرگ معادل با مجموعه آن‌ها تحت شرایط ولتاژ نامتعادل به اثبات رسیده است.



شکل ۱۵- تغییرات تلفات موتور القایی ۵۰ اسب بخاری و دو موتور ۲۵ اسب بخاری کوپل شده در برابر تغییرات k_{cs}



شکل ۱۶- تغییرات توان خروجی موتور القایی ۵۰ اسب بخاری و دو موتور ۲۵ اسب بخاری کوپل شده در برابر تغییرات k_{cs}



شکل ۱۷- تغییرات بازده موتور القایی ۵۰ اسب بخاری و دو موتور ۲۵ اسب بخاری کوپل شده در برابر تغییرات k_{cs}

مراجع

- [۱] زهرا مروج و جواد آذرخش، " شبیه سازی و طبقه بندی وقایع کیفیت توان با استفاده از شبکه عصبی"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۳، شماره ۴۱، تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۱۳۷-۱۴۶.
- [۲] حمیدرضا ایزدفر، " محاسبه جریان و نیرو محرکه مغناطیسی میله های روتور در یک ماشین القایی قفس سنجایی"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۲، بهار ۱۳۹۷، صفحه ۱۷۰-۱۶۳.
- [۳] محمدیوسف ولی و نیما امجدی، "طراحی و ساخت موتور مغناطیسی خورشیدی برای خودروها"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۲، بهار ۱۳۹۷، صفحه ۱۶۱-۱۴۹.

[4] O. P. Taiwo, R. Tiako and I. E. Davidson, "An improvement of voltage unbalance in a low voltage 11/0.4 kV electric power distribution network under 3-phase unbalance load condition using dynamic voltage restorer", 2017 IEEE PES PowerAfrica, Accra, 2017.

- [5] B. Gafford, W. Dueterhoeft, and C. Mosher, "Heating of induction motors on unbalanced voltages," Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, Vol. 78, 1959, pp. 282-286.
- [6] S. Deleanu, G. Von Lipinski, M. Iordache, M. Stanculescu, and D. Niculae, "Performance Evaluation of the Three-Phase Induction Motor Operating in Conditions of Unbalanced Voltage Supply", IEEE, 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS), July 2019.
- [7] J. Williams, "Operation of 3-phase induction motors on unbalanced voltages [includes discussion]", Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, Vol. 73, 1954, pp. 125-133.
- [8] N. Lopatkin, "On the Assessment of Three-Phase Delta Voltages' Unbalance", 2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), Moscow, Russia, 2020.
- [9] J. M. Cullen and J. M. Allwood, "Theoretical efficiency limits for energy conversion devices", Energy, Vol. 35, 2010, pp. 2059-2069.
- [10] S. Mahato, S. Singh, and M. Sharma, "Dynamic behavior of a single-phase self-excited induction generator using a three-phase machine feeding single-phase dynamic load", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 47, 2013, pp. 1-12.
- [11] N. Roy, H. Pota, M. Mahmud, and M. Hossain, "Key factors affecting voltage oscillations of distribution networks with distributed generation and induction motor loads", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 53, 2013, pp. 515-528.
- [12] Y. Horen, P. Strajnikov, and A. Kuperman, "Simple mechanical parameters identification of induction machine using voltage sensor only", Energy conversion and management, Vol. 92, 2015, pp. 60-66.
- [13] S. Marx and D. Bender, "An introduction to symmetrical components, system modeling and fault calculation", 30th Annual Hands-ON Relay School, ed, 2013.
- [14] P. Pillay, P. Hofmann, and M. Manyage, "Derating of induction motors operating with a combination of unbalanced voltages and over-or under-voltages", IEEE Power Engineering Review, Vol. 22, 2002, pp. 51-51.
- [15] J. Faiz, H. Ebrahimpour, and P. Pillay, "Influence of unbalanced voltage on the steady-state performance of a three-phase squirrel-cage induction motor", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, 2004, pp. 657-662.
- [16] P. Gnacinski, "Effect of unbalanced voltage on windings temperature, operational life and load carrying capacity of induction machine", Energy Conversion and Management, Vol. 49, 2008, pp. 761-770.
- [17] J. Faiz and H. Ebrahimpour, "Precise derating of three-phase induction motors with unbalanced voltages," Industry Applications Conference, Fourtieth IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2005, 2005, pp. 485-491.
- [18] C. L. Fortescue, "Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks", Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Vol. 37, 1918, pp. 1027-1140.
- [19] Y.-J. Wang, "Analysis of effects of three-phase voltage unbalance on induction motors with emphasis on the angle of the complex voltage unbalance factor", IEEE Transactions on energy conversion, Vol. 16, 2001, pp. 270-275.
- [20] S. B. Singh and A. K. Singh, "Precise assessment of performance of induction motor under supply imbalance through impedance unbalance factor", Journal of electrical Engineering, Vol. 64, 2013, pp. 31-37.
- [21] E. El-Kharashi and M. El-Dessouki, "Cascading DC Machines to Obtain New Torque/Speed Characteristics and Save Energy in Their Applications", Energy Engineering, Vol. 111, 2013, pp. 16-39.
- [22] V. S. Santos, P. R. V. Felipe, J. R. G. Sarduy, N. A. Lemozy, A. Jurado, and E. C. Quispe, "Procedure for determining induction motor efficiency working under distorted grid voltages", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 30, 2014, pp. 331-339.
- [23] E. El-Kharashi, and M. El-Dessouki, "Coupling induction motors to improve the energy conversion process during balanced and unbalanced operation", Energy, Vol. 65, Feb 2014, pp. 511-516.