

## بررسی عملکرد موتورهای القایی سه فاز تحت شرایط مختلف نامتعادلی ولتاژ و مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی

علیرضا جلیلیان  
استادیار گروه قدرت  
دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده مهندسی برق

رضا روشن فکر  
دانشجوی کارشناسی ارشد  
دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده مهندسی برق

واژه‌های کلیدی: نامتعادلی ولتاژ - موتورهای القایی سه فاز - تبدیل پارک

### چکیده

کمی و کیفی منبع ولتاژ سه فاز روی عملکرد آنها به وضوح تأثیر می‌گذارد [۱].

آمار ANSI نشان می‌دهد که حدود ۶۶٪ از سیستم های توزیع الکتریکی در کشور آمریکا دارای نامتعادلی ولتاژ کمتر از ۱٪، ۹۸٪ دارای نامتعادلی کمتر از ۳٪ و حدود ۲٪ دارای نامتعادلی ولتاژ بیش از ۳٪ هستند. این اعداد و ارقام با توجه به اینکه در آمریکا، قوانین و مقررات ویژه‌ای برای حفظ کیفیت توان وضع گردیده است، آمار خوبی نیست. حال آنکه این آمار در کشورهای در حال توسعه، خیلی نگران کننده تر است [۲].

هر گونه تغییری که در اندازه یا زاویه فاز ولتاژهای سه فاز یک شبکه الکتریکی رخ دهد، باعث ایجاد نامتعادلی ولتاژ در این شبکه می‌گردد. نامتعادلی ولتاژ سه فاز غالباً در شبکه‌های قدرت ضعیف و همچنین در سیستم‌های قدرت سه فاز که بارهای تک فاز بزرگی را تأمین می‌کنند، مشاهده می‌شود. اتصال مثلث باز در ترانسفورماتورها، فیوزهای سوخته در بانک‌های خازنی، بارهای سه فاز نامتعادل، عدم تقارن امپدانس

نامتعادلی ولتاژ یکی از مهمترین عوامل اغتشاش در شبکه‌های توزیع می‌باشد که از عوامل بوجود آورنده آن می‌توان به بارهای تک‌فاز بزرگ، توزیع غیر متعادل بارها و ... اشاره کرد. این مقاله با استفاده از نتایج آزمایش عملی، به بررسی عملکرد یک موتور القایی سه فاز ۱/۵ کفیس سنجایی تحت شرایط نامتعادلی ولتاژ منبع تغذیه پرداخته و اثرات مولفه‌های توالی مثبت و منفی ولتاژ روی راندمان و ضریب قدرت موتور، تحلیل شده است. همچنین مدل واقعی موتور با استفاده از نرم افزار Matlab/Simulink شبیه سازی شده و با نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی مقایسه شده است.

### ۱- مقدمه

امروزه موتورهای القایی سه فاز به شکل گسترده‌ای در صنعت بکارگرفته شده‌اند. حدود ۸۰ درصد بار موجود در صنایع الکتریکی، موتورهای القایی سه فاز هستند که تغییرات

که در آن  $\Delta V_{max}$  بیشترین اختلاف ولتاژ از ولتاژ متوسط و  $V_{avg}$  ولتاژ متوسط است. اشکالی که به این تعریف وارد می‌شود، این است که مشخص نشده است که ولتاژهای مورد استفاده در این تعریف، ولتاژهای فاز هستند یا ولتاژهای خط. از طرف دیگر با این تعریف حالات بیشماری برای ولتاژهای سه‌فاز وجود دارد که یک درصد نامتعادلی ولتاژ مشخصی را نتیجه می‌دهند. استفاده از این تعریف در محیط‌های صنعتی بدلیل محاسبات ساده آن بسیار زیاد است. در مراجع [۱۱ و ۳] تعابیر مختلف از این تعریف آمده است.

- تعریف فاکتور نامتعادلی ولتاژ توسط IEC: [۴]

$$VUF = \frac{V_n}{V_p} * 100 \quad (2)$$

$$VUF = k_u \angle \theta_u \quad (3)$$

که در آن  $V_p$  و  $V_n$  بترتیب ولتاژ توالی منفی و توالی مثبت،  $k_u$  دامنه فاکتور نامتعادلی ولتاژ و  $\theta_u$  زاویه این فاکتور است و از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_n \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$a = 1 \angle 120 \quad (5)$$

که در آن  $V_{ab}$  و  $V_{bc}$  و  $V_{ca}$  ولتاژهای خط ترمینال موتور و  $V_0$  مولفه توالی صفر ولتاژ است. با وجود استفاده مکرر از این تعریف در مقالات مختلف، به ازاء یک مقدار مشخص  $VUF$ ، حالت‌های زیادی برای ولتاژهای سه‌فاز وجود دارد. بدلیل مشخص شدن ولتاژهای توالی مثبت و منفی در محاسبه  $VUF$ ، این تعریف نسبت به تعریف NEMA، تعریف جامع‌تری از نامتعادلی ولتاژ می‌باشد. همچنین در مقایسه با تعریف NEMA، محاسبه  $VUF$  نیاز به محاسبات زیادی دارد و به همین دلیل در محیط‌های صنعتی کمتر از این تعریف استفاده می‌شود.

با توجه به اینکه بردار ولتاژهای خط سه‌فاز تشکیل یک مثلث را می‌دهند [۱۱]، برای محاسبه  $VUF$  می‌توان از روش‌های ساده‌تری استفاده کرد. در یکی از این روش‌ها فاکتور نامتعادلی ولتاژ تنها با استفاده از دامنه ولتاژهای خط

خطوط یا کابل‌های تغذیه در محیط‌های صنعتی، انواع خطاها در سیستم و ... از جمله دلایل بوجود آمدن عدم تعادل ولتاژ در سیستم‌های سه‌فاز می‌باشد [۳]. نامتعادلی ولتاژ اثرات زیان‌آوری روی موتورهای القایی سه‌فاز از جمله اضافه دمای موتور، نامتعادلی جریان خط، اصلاح ظرفیت نامی موتور، نوسانات گشتاور، کاهش بازده موتور و ... دارد [۴].

برای تحلیل موتورهای القایی سه‌فاز تحت شرایط نامتعادلی ولتاژ، روش‌های مختلفی ارائه شده است. روش تحلیل مداری در حوزه مولفه‌های متقارن [۶-۴ و ۱۳] و تحلیل مداری در حوزه فاز [۷] که هر دو روش فوق برای تحلیل حالت ماندگار موتور مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش دیگر استفاده از معادلات ریاضی حاکم بر موتور القایی است که اغلب برای تحلیل حالت گذرا و ماندگار مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹ و ۸].

در این مقاله پس از بررسی ضریب نامتعادلی ولتاژ با استفاده از روابط ریاضی حاکم بر ولتاژها و جریان‌های موتور القایی سه‌فاز، مدل واقعی موتور در نرم افزار Matlab/Simulink شبیه‌سازی شده است. همچنین تلفات هسته، تلفات مکانیکی و اشباع هسته در مدل موتور القایی سه‌فاز منظور شده است. با انجام آزمایش عملی، حالت‌های مختلف نامتعادلی ولتاژ روی یک موتور القایی سه‌فاز ۱/۵ kW اعمال شده است و عملکرد موتور تحت این شرایط مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه شده است.

## ۲- ضریب نامتعادلی ولتاژ

برای نامتعادلی ولتاژ چندین تعریف وجود دارد. معروفترین این ضرایب توسط استانداردهای IEC و NEMA بیان شده است.

- تعریف کلی فاکتور نامتعادلی ولتاژ توسط NEMA: [۹]

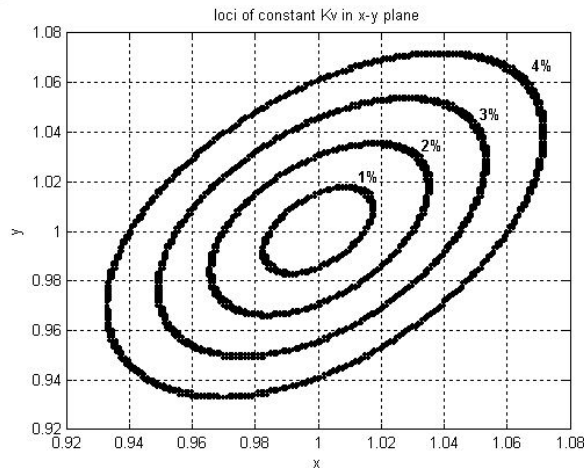
$$\text{درصد نامتعادلی ولتاژ} = \frac{\Delta V_{max}}{V_{avg}} * 100 \quad (1)$$

- 1 - over heating
- 2- line-current unbalance
- 3- derating
- 4 - torque pulsation
- 5 - inefficiency

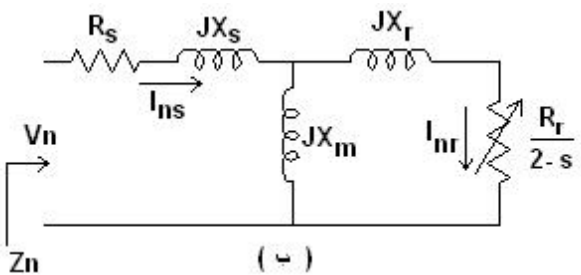
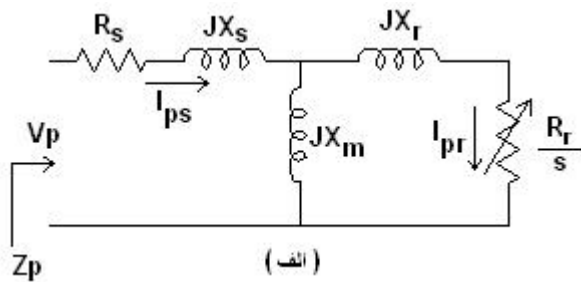
### ۳- مدل موتور القایی سه فاز

#### ۳-۱- مدل مداری

شکل ۲ مدار معادل تک فاز توالی مثبت و منفی موتور القایی سه فاز را نشان می دهد.



شکل ۱ - تعیین فاکتور نامتعادلی ولتاژ برحسب دامنه های ولتاژهای سه فاز



شکل ۲ - مدار معادل تک فاز موتور القایی سه فاز

الف - توالی مثبت ب - توالی منفی

در این شکل،  $R_s$  و  $X_s$  به ترتیب مقاومت و راکتانس استاتور و  $R_r$  و  $X_r$  به ترتیب مقاومت و راکتانس رتور و  $X_m$  راکتانس مغناطیس کنندگی و  $I_{ps}$  و  $I_{pr}$  به ترتیب فازورهای جریان توالی مثبت استاتور و رتور و  $I_{ns}$  و  $I_{nr}$

سه فاز محاسبه می شود [۴]. ابتدا طبق رابطه زیر دامنه ولتاژهای خط سه فاز نرمالیزه می شوند.

$$V_{bc} : V_{ab} : V_{ca} = 1 : x : y \quad (6)$$

که در آن

$$x = V_{ab}/V_{bc} \text{ و } y = V_{ca}/V_{bc} \quad (7)$$

با توجه به رابطه کسینوس ها در مثلث و انتخاب یکی از زوایای ولتاژ خط بطور قراردادی (مثلا  $\theta_{ab} = 0$ )، زوایای دو ولتاژ دیگر از روابط زیر بدست می آیند:

$$\theta_{bc} = \cos^{-1}\left(\frac{1+x^2-y^2}{2x}\right) - 180 \quad (8)$$

$$\theta_{ca} = 180 - \cos^{-1}\left(\frac{x^2+y^2-1}{2xy}\right) \quad (9)$$

حال با استفاده رابطه (۴) می توان دامنه فاکتور نامتعادلی ولتاژ را بدست آورد. شکل ۱ مکان هندسی اندازه  $k_u$  بر حسب  $x$  و  $y$  های مختلف را نشان می دهد. مثلا اگر  $V_{ca} = 209 \text{ V}$  و  $V_{bc} = 220 \text{ V}$  و  $V_{ab} = 214/5$  باشد با استفاده از رابطه (۷)،  $x = 0/975$  و  $y = 0/95$  می شود. حال با توجه به شکل ۱ دامنه نامتعادلی ولتاژ تقریبا ۳ درصد بدست می آید. همچنین از شکل ۱ می توان نتیجه گرفت که برای یک درصد نامتعادلی معین، بیشمار ترکیب ولتاژ سه فاز نامتعادل وجود دارد. مرجع [۱۲] برای محاسبه دامنه ضریب نامتعادلی ولتاژ زیر را بیان کرده است:

$$k_u = \frac{\sqrt{1-\sqrt{3-6\beta}}}{\sqrt{1+\sqrt{3-6\beta}}} \quad (10)$$

که در آن

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (11)$$

با توجه به مثال بیان شده، از رابطه اخیر نیز دامنه ضریب نامتعادلی ولتاژ ۲/۹۶ بدست می آید که با نتیجه قبلی تقریبا برابر است. البته تعاریف دیگری نیز در زمینه درصد نامتعادلی ولتاژ وجود دارد که در مراجع [۱۱۶] آمده است. مرجع [۱۳] بصورت جامع به بررسی اشکالات موجود در تعاریف مختلف نامتعادلی ولتاژ پرداخته است.

#### ۴- پیاده سازی عملی شرایط مختلف نامتعادلی ولتاژ و مقایسه با نتایج شبیه‌سازی

چندین حالت ممکن برای ایجاد شرایط نامتعادلی ولتاژ در سیستم قدرت وجود دارد. از جمله این شرایط عبارتند از: [۳]

(۱) نامتعادلی ولتاژ به شکل کاهش ولتاژ در سه فاز  $3\phi uv$

(۲) نامتعادلی ولتاژ به شکل کاهش ولتاژ در دو فاز  $2\phi uv$

(۳) نامتعادلی ولتاژ به شکل کاهش ولتاژ در یک فاز  $1\phi uv$

(۴) نامتعادلی ولتاژ به شکل افزایش ولتاژ در یک فاز  $1\phi ov$

(۵) نامتعادلی ولتاژ به شکل افزایش ولتاژ در دو فاز  $2\phi ov$

(۶) نامتعادلی ولتاژ به شکل افزایش ولتاژ در سه فاز  $3\phi ov$

البته نامتعادلی ولتاژ می‌تواند در اثر تغییر زاویه فاز ولتاژها نیز بوجود آید. در این آزمایش عملی تنها به بررسی اثرات نامتعادلی ولتاژ روی عملکرد موتورهای القایی سه‌فاز در ۶ حالت فوق پرداخته شده است. حالت‌های مورد بررسی عبارتند از:

(الف) حالت‌هایی که فاکتور نامتعادلی ولتاژ یکسان ولی دامنه ولتاژهای نامتعادل متفاوت است.

(ب) حالت‌هایی که تنها ولتاژ یک فاز نامتعادل باشد و درجه‌های نامتعادلی متفاوت باشد.

(ج) حالت‌هایی که ولتاژ توالی مثبت یکسان بوده ولی ولتاژهای توالی منفی متفاوت باشد.

مشخصات موتور القایی مورد استفاده در شبیه‌سازی و آزمایش عملی به قرار زیر است:

#### DELTA connection

$$\begin{aligned} V_{\text{rated}} &= 220 \text{ V} & P_{\text{rated}} &= 1500 \text{ W} \\ R_s &= 6.24 \ \Omega & R_r &= 4.66 \ \Omega \\ X_{ls} &= X_{lr} = 6.17 \ \Omega & X_m &= 95.29 \ \Omega \\ J &= 0.042 \text{ kg.m}^2 \end{aligned}$$

با انجام آزمایش بی‌باری، میزان تغییرات تلفات موتور بر حسب ولتاژهای ترمینال و جریان‌های استاتور بدست آمد. با استفاده از این تغییرات و روابط موجود [۱۴] تغییرات شار موتور بر حسب جریان و همچنین تغییرات راکتانس مغناطیس کنندگی و تلفات هسته برحسب ولتاژ ترمینال موتور و ضریب اصطکاک بدست آمد. کلیه تغییرات بدست آمده در مدل واقعی شبیه‌سازی شده موتور استفاده شده است و با نتایج عملی بدست آمده مقایسه شده‌اند.

به ترتیب فازورهای جریان توالی منفی استاتور و رتور و  $Z_p$  و  $Z_n$  به ترتیب امپدانس توالی مثبت و امپدانس توالی منفی و  $S$  بیانگر لغزش نامی موتور است [۴].

مدار معادل توالی مثبت شبیه به مدار معادل عمومی موتور القایی سه‌فاز است. مؤلفه توالی منفی ولتاژ منبع در فاصله هوایی موتور القایی شاری تولید می‌کند که با سرعت سنکرون در جهت مخالف با حرکت رتور می‌چرخد. بنابراین فرکانس جریان رتور مربوط به مؤلفه توالی منفی، برابر  $(2-s)f_1$  می‌باشد که در شرایط کار عادی موتور تقریباً دو برابر فرکانس منبع می‌باشد [۹].

#### ۳-۲- مدل ریاضی

معادلات حاکم بر جریان‌ها و ولتاژهای موتور القایی سه فاز به قرار زیر است [۱۴]:

$$v_s = i_s r_s + \frac{d\lambda_s}{dt} \quad (12)$$

$$v_r = i_r r_r + \frac{d\lambda_r}{dt} \quad (13)$$

با استفاده از تبدیل پارک، متغیرهای فاز  $a$  و  $b$  و  $c$  استاتور و رتور به متغیرهای  $q$  و  $d$  در دستگاه قاب مرجع با سرعت اختیاری  $\omega$  تبدیل می‌شوند.

$$v_q = r_q i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} - (\omega - \omega_r) \lambda_d \quad (14)$$

$$v_d = r_d i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} + (\omega - \omega_r) \lambda_q \quad (15)$$

برای بررسی عملکرد موتورهای القایی سه‌فاز تحت شرایط نامتعادلی ولتاژ، معمولاً قاب مرجع ساکن در نظر گرفته می‌شود [۱۴ و ۱۵].

معادله مکانیکی حاکم بر رتور چنین است:

$$\frac{2J\omega_b}{P} \frac{d(\omega_r/\omega_b)}{dt} = T_{em} + T_{mech} - T_{damp} \quad (28)$$

که در آن  $J$  ممان اینرسی رتور بر حسب  $\text{kg.m}^2$  تعداد قطب‌های موتور،  $T_{em}$  گشتاور الکتریکی،  $T_{mech}$  گشتاور بار و  $T_{damp}$  گشتاور میرا کننده است که شامل موارد زیر است:

$$T_{damp} = T_{friction\&winding} + T_{core} \quad (29)$$

گشتاورهای ناشی از تلفات اصطکاک و بادخوری و تلفات هسته، گشتاور میرا کننده را بوجود می‌آورند.

موتور در این حالت ۶۰٪ توان نامی در نظر گرفته شد. برای ایجاد شرایط مختلف نامتعادلی از یک دستگاه اتوترانسفورماتور سه‌فاز و سه دستگاه اتوترانسفورماتور تک‌فاز و همچنین از یک دستگاه Power Multi\_Meter دیجیتالی ساخت انگلستان برای اندازه‌گیری پارامترهای موتور استفاده شده است. اتصالات منبع تغذیه مورد استفاده ستاره می‌باشد.

#### ۴-۱- عملکرد موتور تحت ۶ حالت نامتعادلی ولتاژ با VUF یکسان

به منظور بررسی عملکرد ۶ حالت مختلف نامتعادلی ولتاژ در یک سیستم واقعی، موتور ۱/۵ kW با مشخصات ذکر شده انتخاب شد. برای جلوگیری از افزایش جریان موتور در حالت ولتاژ نامتعادل (بیش از مقدار نامی) توان خروجی

جدول ۱ - نتایج عملی ۶ حالت مختلف نامتعادلی ولتاژ در ۶۰٪ توان خروجی نامی در  $VUF = 2\%$

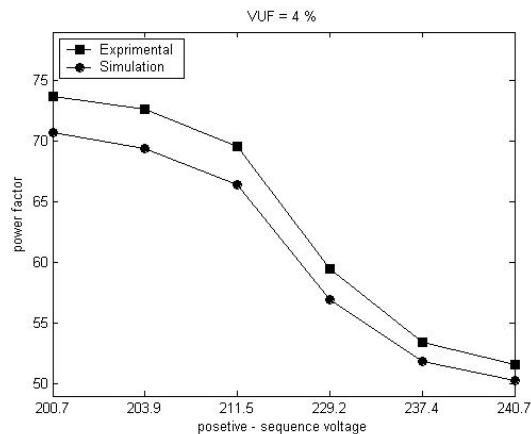
	$V_{ab}$ (V)	$V_{bc}$ (V)	$V_{ca}$ (V)	$V_p$ (V)	$V_n$ (V)	بازده (%)	ضریب قدرت (%)	تلفات (W)	توان ورودی (W)
balance	۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۰	۷۷/۵	۶۵/۵	۲۶۲	۱۱۶۲
3 $\phi$ uv	۲۰۶/۲	۲۱۱/۳	۲۰۴/۴	۲۰۷/۳	۴/۲	۷۷/۴	۷۰/۷	۲۶۳	۱۱۶۳
2 $\phi$ uv	۲۰۷/۶	۲۱۴/۵	۲۱۳/۱	۲۱۱/۷	۴/۲	۷۷/۳	۶۸/۸	۲۶۴	۱۱۶۴
1 $\phi$ uv	۲۱۳/۵	۲۲۰	۲۱۳/۵	۲۱۵/۶	۴/۳	۷۷/۲	۶۶/۹	۲۶۶	۱۱۶۶
1 $\phi$ ov	۲۲۶/۸	۲۲۰	۲۲۶/۸	۲۲۴/۵	۴/۵	۷۵/۸	۶۲/۴	۲۸۷	۱۱۸۷
2 $\phi$ ov	۲۳۰/۸	۲۲۷/۸	۲۲۳	۲۲۷/۲	۴/۵	۷۵/۴	۶۱	۲۹۴	۱۱۹۴
3 $\phi$ ov	۲۳۷/۳	۲۳۰/۸	۲۳۰	۲۳۲/۷	۴/۶	۷۴/۷	۵۷/۸	۳۰۴	۱۲۰۴

جدول ۲ - نتایج عملی ۶ حالت مختلف نامتعادلی ولتاژ در ۶۰٪ توان خروجی نامی در  $VUF = 4\%$

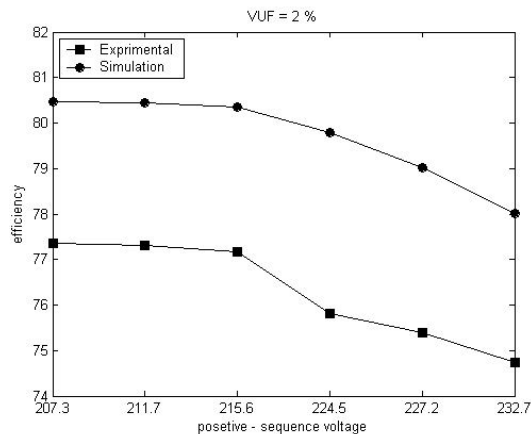
	$V_{ab}$ (V)	$V_{bc}$ (V)	$V_{ca}$ (V)	$V_p$ (V)	$V_n$ (V)	بازده (%)	ضریب قدرت (%)	تلفات (W)	توان ورودی (W)
balance	۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۰	۷۷/۵	۶۵/۵	۲۶۲	۱۱۶۲
3 $\phi$ uv	۱۹۲/۹	۲۰۵/۹	۲۰۳/۶	۲۰۰/۷	۸	۷۷/۳	۷۳/۷	۲۶۴	۱۱۶۴
2 $\phi$ uv	۱۹۵/۸	۲۰۹	۲۰۶/۹	۲۰۳/۹	۸	۷۷/۲	۷۲/۶	۲۶۵	۱۱۶۵
1 $\phi$ uv	۲۰۷/۴	۲۲۰	۲۰۷/۴	۲۱۱/۵	۸/۴	۷۶/۹	۶۹/۶	۲۷۰	۱۱۷۰
1 $\phi$ ov	۲۳۳/۹	۲۲۰	۲۳۳/۸	۲۲۹/۲	۹/۲	۷۶/۲	۵۹/۴	۲۸۰	۱۱۸۰
2 $\phi$ ov	۲۴۶/۱	۲۲۹/۸	۲۳۶/۵	۲۳۷/۴	۹/۵	۷۵/۳	۵۳/۶	۲۹۵	۱۱۹۵
3 $\phi$ ov	۲۴۹/۳	۲۳۲/۷	۲۴۰/۲	۲۴۰/۷	۹/۶	۷۴/۶	۵۱/۹	۳۰۵	۱۲۰۵

می‌شود، به ازاء یک مقدار VUF تغییرات مولفه توالی مثبت  $V = 25/4$  و  $V = 40$  و تغییرات مولفه توالی منفی  $V = 0/48$  و  $V = 1/63$  بترتیب برای  $VUF = 2\%$  و  $VUF = 4\%$  می‌باشد. تغییرات بازده و ضریب قدرت موتور القایی سه‌فاز در این حالت از آزمایش به همراه نتایج حاصل از شبیه‌سازی موتور در شکل‌های ۲ و ۳ و ۴ و ۵ آمده است.

دامنه ولتاژهای سه‌فاز نامتعادل به همراه ولتاژهای توالی مثبت و منفی در  $VUF = 2\%$  در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین جدول ۱ نتایج محاسبات در آزمایش عملی شامل بازده، ضریب قدرت، توان تلفاتی و توان ورودی را نشان می‌دهد. جدول ۲ نیز نتایج آزمایش عملی را در  $VUF = 4\%$  نشان می‌دهد. همانطور که از این جداول مشاهده



شکل ۵ - تغییرات ضریب قدرت موتور در ۶۰٪ توان نامی خروجی و  $VUF=4\%$  برحسب مولفه توالی مثبت ولتاژ

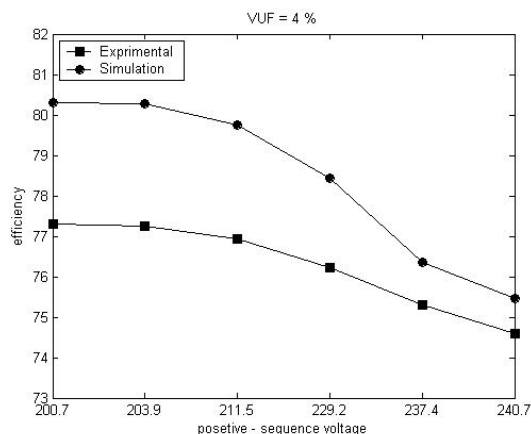


شکل ۲ - تغییرات بازده موتور در ۶۰٪ توان نامی خروجی و  $VUF=2\%$  برحسب مولفه توالی مثبت ولتاژ

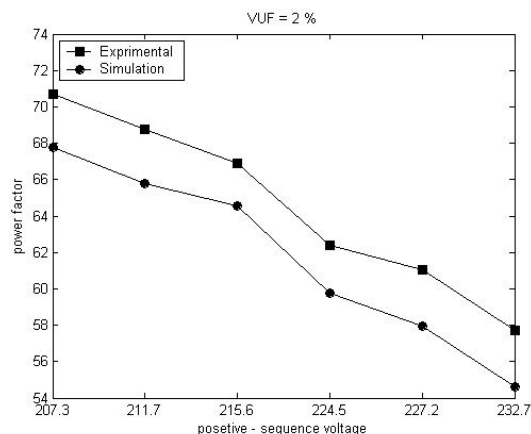
همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، هر چقدر ولتاژ توالی مثبت بیشتر شود، بازده و ضریب قدرت موتور کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که در برخی از حالات نامتعادلی ولتاژ، ضریب قدرت موتور بیشتر از حالت تغذیه متعادل می‌باشد. یکی از دلایل کاهش ضریب قدرت موتور با افزایش مولفه توالی مثبت ولتاژ، به اشباع رفتن هسته، کاهش راکتانس مغناطیس‌کنندگی، افزایش جریان مغناطیس‌کنندگی و در نتیجه آن افزایش توان راکتیو موتور می‌باشد. البته با افزایش مولفه توالی مثبت ولتاژ، توان اکتیو ورودی نیز افزایش می‌یابد، اما میزان افزایش توان راکتیو خیلی بیشتر از افزایش توان اکتیو است. در نتیجه ضریب قدرت با افزایش مولفه توالی مثبت ولتاژ، کاهش می‌یابد. برای مثال در جدول ۱ افزایش توان اکتیو از حالت  $3\phi uv$  به حالت  $3\phi ov$  که متناظر با افزایش ولتاژ توالی مثبت است،  $41\text{ W}$  و افزایش توان راکتیو  $540\text{ VAR}$  می‌باشد. در نتیجه کاهش ضریب قدرت  $12/9\%$  حاصل می‌شود.

#### ۲-۴- عملکرد موتور تحت درصدهای مختلف نامتعادلی ولتاژ به شکل کاهش ولتاژ یک فاز

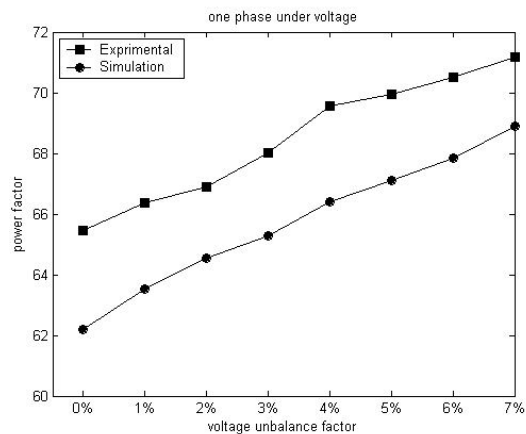
جدول ۳ دامنه ولتاژهای سه‌فاز نامتعادل به همراه ولتاژهای توالی مثبت و منفی را نشان می‌دهد. در این آزمایش تنها دامنه ولتاژ فاز a منبع در هفت مرحله کم شده است و ولتاژهای فازهای دیگر در  $127\text{ V}$  ثابت نگه داشته می‌شود. در این



شکل ۳ - تغییرات بازده موتور در ۶۰٪ توان نامی خروجی و  $VUF=4\%$  برحسب مولفه توالی مثبت ولتاژ



شکل ۴ - تغییرات ضریب قدرت موتور در ۶۰٪ توان نامی خروجی و  $VUF=2\%$  برحسب مولفه توالی مثبت ولتاژ

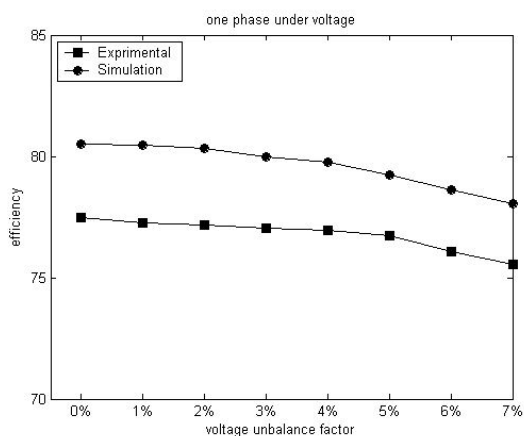


شکل ۷ - تغییرات ضریب قدرت موتور در حالات مختلف نامتعادلی

جدول ۳ در ۶۰٪ توان نامی خروجی

علاوه بر آن توان اکتیو نیز بدلیل افزایش تلفات، افزایش می‌یابد. در نتیجه ضریب قدرت موتور تحت شرایط نامتعادلی ولتاژ تک‌فاز نسبت به حالت متعادل، افزایش می‌یابد. لذا می‌بایست در طراحی سیستم تصحیح ضریب قدرت موتورهای القایی سه‌فاز، افزایش ضریب قدرت در شرایط نامتعادلی ولتاژ تک‌فاز، لحاظ شود.

مرحله نیز توان خروجی موتور ۶۰٪ توان نامی در نظر گرفته شده است. تغییرات بازده و ضریب قدرت موتور بر حسب درصد نامتعادلی ولتاژ در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، افزایش درصد نامتعادلی ولتاژ منجر به کاهش بازده و افزایش ضریب قدرت موتور می‌شود. در این آزمایش نیز بدلیل کاهش مولفه توانی مثبت ولتاژ با افزایش درصد نامتعادلی ولتاژ، راکتانس مغناطیس‌کنندگی افزایش می‌یابد، در نتیجه جریان مغناطیس‌کنندگی کاهش یافته و لذا توان راکتیو موتور کاهش می‌یابد.



شکل ۶ - تغییرات بازده موتور در حالات مختلف نامتعادلی جدول ۳

در ۶۰٪ توان نامی خروجی

جدول ۳ - نتایج عملی نامتعادلی ولتاژ به شکل کاهش ولتاژ یک فاز در ۶۰٪ توان نامی خروجی

VUF	V <sub>ab</sub> (V)	V <sub>bc</sub> (V)	V <sub>ca</sub> (V)	V <sub>p</sub> (V)	V <sub>n</sub> (V)	بازده (%)	ضریب قدرت (%)	تلفات (W)	توان ورودی (W)
٪۰	۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۰	۷۷/۵	۶۵/۵	۲۶۲	۱۱۶۲
٪۱	۲۱۶/۷	۲۲۰	۲۱۶/۷	۲۱۷/۸	۲/۲	۷۷/۳	۶۶/۴	۲۶۵	۱۱۶۵
٪۲	۲۱۳/۵	۲۲۰	۲۱۳/۵	۲۱۵/۶	۴/۳	۷۷/۲	۶۶/۹	۲۶۶	۱۱۶۶
٪۳	۲۱۰/۴	۲۲۰	۲۱۰/۴	۲۱۳/۶	۶/۴	۷۷	۶۸	۲۶۸	۱۱۶۸
٪۴	۲۰۷/۵	۲۲۰	۲۰۷/۵	۲۱۱/۵	۸/۴	۷۶/۹	۶۹/۶	۲۶۹	۱۱۶۹
٪۵	۲۰۴/۵	۲۲۰	۲۰۴/۵	۲۰۹/۵	۱۰/۴	۷۶/۷	۶۹/۹	۲۷۲	۱۱۷۲
٪۶	۲۰۱/۶	۲۲۰	۲۰۱/۶	۲۰۷/۵	۱۲/۵	۷۶	۷۰	۲۸۳	۱۱۸۳
٪۷	۱۹۸/۷	۲۲۰	۱۹۸/۷	۲۰۵/۵	۱۴/۴	۷۵/۶	۷۱/۲	۲۹۱	۱۱۹۱

روی ضریب قدرت موتور ندارد و این بخاطر ثابت بودن مولفه توالی مثبت ولتاژ است. در واقع در این حالت تغییرات توان راکتیو موتور چندان زیاد نیست (حدود VAR ۳۷). در نتیجه با تغییرات ۳۲W توان اکتیو از حالت متعادل تا نامتعادلی ۷٪، انتظار می‌رود که ضریب قدرت تغییرات چندانی نداشته باشد. با ثابت بودن مولفه توالی مثبت ولتاژ بطور یقین می‌توان بیان کرد که در صورت افزایش مولفه توالی منفی ولتاژ که متناظر با افزایش درصد نامتعادلی ولتاژ نیز است، تلفات موتور افزایش یافته و در نتیجه آن بازده موتور کم شود.

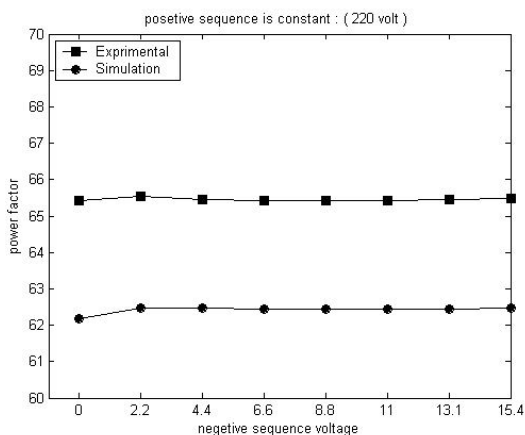
### ۳-۴- عملکرد موتور تحت درصدهای مختلف نامتعادلی ولتاژ با ولتاژ مولفه مثبت ثابت

دامنه ولتاژهای سه‌فاز نامتعادل به همراه ولتاژهای توالی مثبت و منفی در این مرحله از آزمایش در جدول ۴ آمده است. همچنین بازده، ضریب قدرت، توان تلفاتی و توان ورودی در این جدول نشان داده شده است.

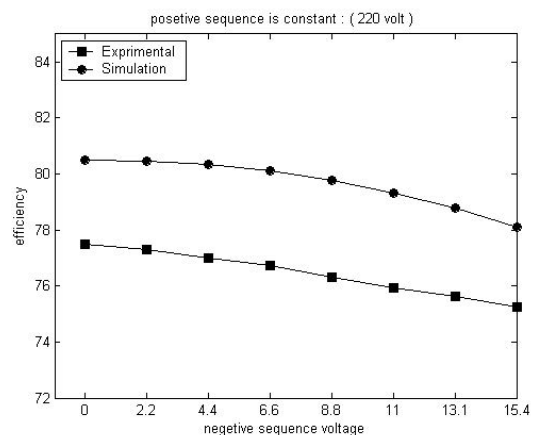
شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب تغییرات بازده و ضریب قدرت موتور را بر حسب مولفه توالی منفی ولتاژ در دو حالت عملی و شبیه‌سازی نشان می‌دهند. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود تغییرات مولفه توالی منفی ولتاژ تاثیر زیادی

جدول ۴ - نتایج عملی درصدهای مختلف نامتعادلی ولتاژ با ولتاژ مولفه مثبت ثابت در ۶۰٪ توان خروجی نامی

VUF	V <sub>ab</sub> (V)	V <sub>bc</sub> (V)	V <sub>ca</sub> (V)	V <sub>p</sub> (V)	V <sub>n</sub> (V)	بازده (%)	ضریب قدرت (%)	تلفات (W)	توان ورودی (W)
٪۰	۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۰	۷۷/۵	۶۵/۵	۲۶۲	۱۱۶۲
٪۱	۲۲۱/۹	۲۱۸/۱	۲۲۰	۲۲۰	۲/۲	۷۷/۳	۶۵/۵	۲۶۴	۱۱۶۴
٪۲	۲۲۳/۸	۲۱۶/۲	۲۲۰	۲۲۰	۴/۴	۷۷	۶۵/۵	۲۶۹	۱۱۶۹
٪۳	۲۲۵/۷	۲۱۴/۳	۲۲۰	۲۲۰	۶/۶	۷۶/۷	۶۵/۴	۲۷۳	۱۱۷۳
٪۴	۲۲۷/۶	۲۱۲/۴	۲۲۰/۱	۲۲۰	۸/۸	۷۶/۳	۶۵/۴	۲۷۹	۱۱۷۹
٪۵	۲۲۹/۶	۲۱۰/۵	۲۲۰/۲	۲۲۰	۱۱	۷۵/۹	۶۵/۴	۲۸۵	۱۱۸۵
٪۶	۲۳۱/۵	۲۰۸/۶	۲۲۰/۴	۲۲۰	۱۳/۲	۷۵/۶	۶۵/۴	۲۹۰	۱۱۹۰
٪۷	۲۳۳/۴	۲۰۶/۸	۲۲۰/۵	۲۲۰	۱۵/۴	۷۵/۲	۶۵/۵	۲۹۶	۱۱۹۶



شکل ۹ - تغییرات ضریب قدرت موتور در حالات مختلف نامتعادلی جدول ۴ در ۶۰٪ توان نامی خروجی



شکل ۸ - تغییرات بازده موتور در حالات مختلف نامتعادلی جدول ۴ در ۶۰٪ توان نامی خروجی



باشد، ضریب قدرت موتور کاهش می‌یابد. در واقع مولفه توانی منفی ولتاژ نقش چندانی در ضریب قدرت موتورهای القایی سه‌فاز ندارد. یکی از دلایل کاهش ضریب قدرت موتور با افزایش مولفه توانی مثبت ولتاژ، به اشباع رفتن هسته، کاهش راکتانس مغناطیس‌کنندگی، افزایش جریان مغناطیس‌کنندگی و در نتیجه آن افزایش توان راکتیو موتور می‌باشد. البته با افزایش مولفه توانی مثبت ولتاژ، توان اکتیو ورودی نیز افزایش می‌یابد، اما میزان افزایش توان راکتیو خیلی بیشتر از افزایش توان اکتیو است. در نتیجه ضریب قدرت با افزایش ولتاژ توانی مثبت، کاهش می‌یابد.

با دانستن مولفه توانی مثبت ولتاژ، نمی‌توان در مورد بازده موتور قضاوت کرد. در واقع هر دو مولفه توانی مثبت و منفی ولتاژ در میزان بازده موتور نقش دارند. اما با مولفه ولتاژ توانی مثبت ثابت، بطور یقین می‌توان گفت که با افزایش مولفه توانی منفی ولتاژ که متناظر با افزایش درصد نامتعادلی ولتاژ نیز است، تلفات موتور افزایش یافته و در نتیجه بازده موتور کاهش می‌یابد.

توان تلفاتی موتور تحت هر شرایط نامتعادلی ولتاژ نسبت به حالت متعادل، بیشتر می‌شود. در نتیجه بازده موتور نیز کمتر می‌گردد و لذا توان مصرفی موتور به ازاء توان خروجی یکسان در مقایسه با حالت متعادل، بیشتر می‌شود. در نتیجه هزینه برق مصرف‌کنندگان در این شرایط افزایش می‌یابد.

علاوه بر بحث اقتصادی فوق، جریان‌های موتور تحت شرایط نامتعادلی ولتاژ دستخوش تغییرات زیادی می‌شوند، بطوریکه جریان‌های فازهای مختلف ممکن است از جریان مجاز استاتور فراتر رفته و موجب بروز مشکلات عایقی در موتور گردد. کاهش اجباری ظرفیت نامی موتور (derating) می‌تواند این مشکلات را تا حدود زیادی برطرف نماید.

لذا با توجه به استفاده فراوان و روزافزون از موتورهای القایی سه‌فاز، توجه به عملکرد آنها در شرایط نامتعادلی ولتاژ، ضروری به نظر می‌رسد.

با توجه به نتایج موجود در جداول ۱ تا ۴ می‌توان نتیجه گرفت که برای بررسی عملکرد موتور تحت شرایط مختلف نامتعادلی ولتاژ، تنها دانستن درصد نامتعادلی کافی نیست، بلکه علاوه بر آن دانستن اندازه ولتاژهای مولفه توانی مثبت و منفی ضروری است. برای مثال، در جدول ۱ برای حالت نامتعادلی به صورت  $3\phi 0V$  و  $VUF = 2\%$ ، بازده و ضریب قدرت موتور به ترتیب  $74.7\%$  و  $57.7\%$  می‌باشد. در حالیکه در جدول ۳ برای حالت  $VUF = 2\%$ ، بازده و ضریب قدرت موتور به ترتیب  $77.2\%$  و  $66.9\%$  است. نتایج شبیه‌سازی و عملی جریان‌های استاتور و سرعت رتور برای یک حالت از حالات مختلف نامتعادلی ولتاژ انجام شده ( $3\phi uv$  در جدول ۲)، به عنوان نمونه در جدول ۵ بیان شده است.

جدول ۵ - مقایسه نتایج عملی و شبیه‌سازی در حالت  $3\phi uv$  مطابق

جدول ۲ در  $VUF = 4\%$  و توان نامی خروجی

	شبیه‌سازی	عملی
$n_r$ (rpm)	۱۴۲۷	۱۴۲۱
$i_R$ (A)	۳/۹	۴/۱
$i_S$ (A)	۴/۴	۴/۵
$i_T$ (A)	۵/۴	۵/۵

با توجه به شکل‌های ۱ تا ۹ و جدول ۵، نتایج شبیه‌سازی از دقت قابل قبولی نسبت به نتایج عملی برخوردار است. البته در این شبیه‌سازی از اثرات تغییرات دما و فرکانس روی پارامترهای موتور و همچنین از تلفات سرگردان موتور صرف‌نظر شده است.

## ۵- نتیجه‌گیری

در بررسی عملکرد موتورهای القایی سه‌فاز تحت شرایط مختلف نامتعادلی ولتاژ می‌بایست علاوه بر درصد نامتعادلی ولتاژ به مولفه‌های توانی مثبت و منفی ولتاژ نیز توجه داشت. با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان چنین بیان کرد که هرچقدر مولفه توانی مثبت ولتاژ نسبت به ولتاژ نامی بیشتر

۶- مراجع

- [9] Vahedi A., Izadian A. " *Performance Analysis of 3-Phase Induction Motor Fed by Unbalanced Voltage* ", 15<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines, ICE2002, August 2002
- [10] Jalilian A." *Three Phase Induction Motor Performance Under Unbalanced Voltage Condition* " 16<sup>th</sup> International Power System Conference Proceeding, PSC2001, Tehran, Iran
- [11] Jeong S.G. " *Representing Line Voltage Unbalance* " Industry Applications Conference, 2002, 37<sup>th</sup> IAS Annual Meeting , Vol. 3, pp.1724-1732
- [12] Gosbell V.J. " *Voltage Unbalance* ", Technical Note No. 6, October 2002, University of Wollongong
- [۱۳] فیض، ابراهیم پور " تعاریف نامتعادلی ولتاژ و تأثیر آنها بر تحلیل عملکرد موتور القایی سه‌فاز، " هفدهمین کنفرانس بین‌المللی برق ایران، PSC 2002، تهران
- [14] Ong C.M. " *Dynamic Simulation of Electric Machinery* ", Prentice Hall PRT, 1998
- [15] Krause P.C. " *Analysis of Electric Machinery* ", IEEE Press, 1995
- [1] Souto C.N. " *Power Quality Impact on Performance and Associated Costs of Three-Phase Induction Motors* " 8<sup>th</sup> International Conference on Harmonics and Quality of Power, Greece, Oct. 1998
- [2] Jouanne A.V., Banerjee B., " *Assessment of Voltage Unbalance* " IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 16, No. 4, October 2001, pp. 782-790
- [3] Lee C.Y. " *Effects of Unbalanced Voltage on Operation Performance of a Three-Phase Induction Motor* " IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 14, No. 2, June 1999, pp. 202-208
- [4] Wang Y.J. " *Analysis of Effects of Three-Phase Voltage Unbalance on Induction Motor With Emphasis on The Angle of the Complex Voltage Unbalance Factor* " IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 16, No. 3, Sep. 2001, pp. 270-275
- [5] Wang Y.J. " *an Analytical Study on Steady-State Performance of an Induction Motor Connected to Unbalanced Three-Phase Voltage* ", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol.1, 2000, pp.159-164
- [6] Pillay P. " *Derating of Induction Motors Operating With a Combination of Unbalanced Voltages and Over or Undervoltages* " IEEE Trans on Energy Conversion, vol. 17, No. 4, Dec. 2002
- [7] Kersting W.H. " *Phase Frame Analysis of the Effects of Voltage Unbalance on Induction Machines* " IEEE Trans on Industry Application, vol. 33, No. 2, 1997, pp. 415-420
- [8] Wang Li, " *Analysis of Unbalanced Voltage on Startup Transients of a Three-Phase Induction Motor Using EMTP Models* " IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 1, 2000, pp. 308-312

#