ارائه مدلی برای ژنراتور تغذیه دوگانه در توربین بادی بر اساس روابط تحلیلی دقیق هارمونیکی و نوسان

مجید نیری پور و محمدمهدی منصوری

چکیده: در شرایط عملکرد عادی یا خطای ژنراتورهای القایی با تغذیه دوگانه، مؤلفههای فرکانسی مختلفی در هر یک از سیم پیچهای استاتور و روتور یا در بخش مکانیکی میتواند ایجاد گردند که قابل انتقال به طرفهای دیگر هستند و میتوانند مؤلفههای فرکانسی دیگری ایجاد کنند. در این مقاله ابتدا روابط تحلیلی دقیقی برای این مؤلفههای فرکانسی و انتقال آنها به طرفهای دیگر بر حسب دامنه و فاز مؤلفههای فرکانسی ارائه گردیده است که صورت کامل تری از روابط ارائه شده در آخرین مقالات در این زمینه است. سپس مدلی برای ژنراتور تغذیه دوگانه ارائه شده که با دقت خوبی میتواند مؤلفههای فرکانسی را در بخشهای الکتریکی و مکانیکی ژنراتور محاسبه و مدل سازی نماید. در انتها صحت و دقت روابط و مدل ارائه شده با مطالعات موردی صحت سنجی شده است.

کلید واژه: تحلیل هارمونیکی، مدل هارمونیکی، ژنراتور تغذیه دوگانه.

۱- مقدمه

ماشین القایی تغذیه دوبل (DFIG) از نوع ماشین القایی روتور سیم پیچی شده است که به دلیل امکان کنترل سرعت، کاربردهای مختلفی در صنعت دارد [۱]. این ماشینها در دو دهه اخیر نیز در توربینهای بادی نوع C به عنوان ژنراتور مورد استقبال جدی قرار گرفته است [۲] به نحوی که هم اکنون در بیش از ۵۰٪ بازار سیستم تبدیل انرژی باد استفاده می شوند [۳].

مزیت اصلی این ژنراتور این است که با اتصال استاتور به شبکه با فرکانس ثابت می تواند در سرعتهای مختلف مکانیکی توان الکتریکی با فرکانس ثابت تولید کند. این امکان از طریق کنترل فرکانس در سیم پیچ روتور صورت می گیرد که به وسیله مبدلهای الکترونیک قدرت انجام می شود. توان نامی این مبدلها در حد یک سوم توان نامی نسبت به ژنراتور است و این مزیت دیگر استفاده از این ژنراتور است [۴] و [۵].

با اتصال سیم پیچ استاتور به شبکه با فرکانس f_s و کنترل فرکانس سیم پیچ روتور (f_r) میتوان لغزش و در نتیجه توانهای اکتیو و راکتیو عبوری از سیم پیچهای استاتور و روتور این ژنراتور را که در سرعت مکانیکی بالاتر و یا پایی*ن*تر از سرعت سنکرون $(f_s \pm f_r) = \mathfrak{M}_m$ جرخانده میشود کنترل نمود [۶]. از این رو کنترل فرکانس نقش اساسی در کنترل و بهره گیری از مزیتهای این ژنراتور دارد [۲]. کنترل فرکانس روتور در توربینهای بادی با DFIG از طریق مبدل الکترونیک قدرت سمت روتور (RSC) صورت می گیرد. این مبدل از نوع مبدل تمامموج سهفاز کنترل شده DC به AC است [۴] تا [۶] که به دلیل ماهیت

کلیدزنی الکترونیک قدرت و مدولاسیون پهنای پالس، علاوه بر مؤلفههای اصلی فرکانس، مؤلفههای هارمونیکی نیز دارد.

از طرفی ماشین القایی تغذیه دوگانه را میتوان به صورت یک بلوک با سه بخش متصل به آن نظر گرفت که شامل استاتور، روتور و شافت مکانیکی است که از این سه، حداقل یکی ورودی توان و حداقل یکی خروجی توان است. هر سه این اتصالها میتوانند تزریق کننده هارمونیک یا تأثیرپذیرنده از هارمونیکهای دو اتصال دیگر باشند. نظر به نقش و اهمیت فرکانس در مشخصه اصلی DFIG و منابع متعدد هارمونیکی در این ژنراتور و انتقال و تبادل هارمونیکها بین سه بخش سیمپیچ استاتور، سیمپیچ روتور و بخش مکانیکی، این موضوع مورد توجه پژوهشهای متعددی قرار گرفته است [۶] تا [۲۱].

می توان از عدم تعادل ولتاژ، فلیکر، خطاهای شبکه و هارمونیکهای شبکه به عنوان منابع ایجادکننده هارمونیک از سمت شبکه نام برد [۶]، [۸]، [۱۰]، [۱۱]، [۱۴] و [۱۵]. نحوه سیم پیچی و ساختار استاتور و خرابی های سیم پیچ استاتور نیز منابع اصلی تولید هارمونیک در سیم پیچ استاتور هستند [۶] و [۱۷].

نوسانات باد، اثر سایه پایه توربین، اختلاف سرعت باد در ارتفاع کم و زیاد [۱۸] و [۱۹]، خرابیهای جعبه دنده، عدم تقارن پرهها و خرابی بلبرینگها ایجادکننده هارمونیکهایی در گشتاور و در بخش مکانیکی هستند [۶] و [۲۰].

هارمونیکهای مبدلهای الکترونیک قدرت [۶]، [۹] و [۱۳]، هارمونیکهای ایجادشده به علت عدم توزیع سینوسی شار، هارمونیکهای اشباع هسته [۲] و هارمونیکهای ناشی از انواع خطاهای بخش الکتریکی را میتوان از عوامل موجود در طرف روتور نام برد [۱۲] و [۱۷].

مطالعات هارمونیکی DFIG از دیدگاههای مختلفی نیز مورد توجه قرار گرفته است. از دیدگاه کیفیت توان و اتصال به شبکه باید الزامات و استانداردهایی همانند IEEE-Std۵۱۹ و ۲۱–۱۲۵۰ [۲۲] و داشته باشند [۲۱]. تحلیل هارمونیکی از دیدگاه قابلیت اطمینان [۲۲] و تأثیر بر عملکرد سیستم کنترل DFIG [۱۰] و [۳۳] نیز مهم است و همچنین تحلیل هارمونیکی در کاهش خرابیها، تشخیص خطاها و برنامهریزی سیستمهای نگهداری نیز از ابزارهای مؤثر است [۱۲]، [۲۰]، [۲۲] و [۲۴].

اولین تحلیل هارمونیکی انجامشده DFIG در [۷] است که با فرض ثابت بودن سرعت مکانیکی، اثرات هارمونیکی جریان روتور و استاتور را بررسی نموده است. سپس در [۸] بر اساس تئوری میدان چرخان اثرات نامتعادلی در روتور ماشین القایی روتور سیم پیچی شده بررسی شده است.

در [۱۳] مؤلفههای هارمونیکی روتور و تأثیر آن بر استاتور و سرعت مکانیکی تحلیل شده و فقط یک روش عددی برای محاسبه آن ارائه گردیده است، در حالی که به مدلی برای محاسبه مؤلفههای هارمونیکی و

این مقاله در تاریخ ۸ آذر ماه ۱۳۹۲ دریافت و در تاریخ ۵ آذر ماه ۱۳۹۳ بازنگری شد. مجید نیریپور، دانشکده برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، (email: nayeri@sutech.ac.ir).

محمدمهدی منصوری، دانشکده برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، شیراز، (email: mansuri5m@yahcoo.com)

دامنه آنها نیاز است. همچنین تحلیل مؤلفههای هارمونیکی گشتاور صورت نگرفته است.

در [۶] اثر هارمونیکهای روتور همزمان با نامتعادلی ولتاژ استاتور بررسی شده است. این تحلیل با فرض ثابت بودن سرعت ژنراتور انجام شده است در حالی که در عمل نوساناتی در سرعت ژنراتور نیز داریم. در این مقاله نیز فقط بر فرکانس مؤلفههای فرکانسی تمرکز شده و دامنه آنها مورد مطالعه قرار نگرفته است.

در [۱۰] روابط الکترومغناطیس ماشین در شرایط عدم تعادل ولتاژ شبکه و هارمونیکهای شبکه ارائه شده است. هر چند در این مقاله از روش مدل المان نامحدود برای مدلسازی الکترومغناطیسی ماشین استفاده شده است ولی سرعت ژنراتور ثابت فرض شده [۱۵] که مطابق با شرایط عملی نیست و ارتباط مؤلفههای هارمونیکی استاتور، روتور با سرعت و گشتاور مکانیکی بیان نشده است. در [۱۱] اثر بار غیر خطی و ایجاد جریان غیر خطی و در نتیجه ولتاژ هارمونیکی در استاتور DFIG بررسی شده و سپس روش کنترلی برای بهبود آن ارائه شده است. در [۱۲] روشی بر اساس تشخیص مؤلفههای هارمونیکی مدوله مده توسط روتور برای تشخیص خطای سیم پیچها ارائه شده و فقط به ذکر مؤلفه های هارمونیکی تولید شده اکتفا شده است.

در برخی کارهای انجامشده تا کنون، مؤلفههای فرکانسی در استاتور، روتور و سرعت به صورت نسبی بررسی شدهاند و ارتباط مؤلفههای فرکانسی در استاتور و روتور در اغلب این مطالعات بیان شده است اما دامنه و فاز این مؤلفههای فرکانسی و ارتباط دامنه مؤلفههای مختلف فرکانسی در استاتور و روتور به صورت روابط تحلیلی تا کنون ارائه نشده است. همچنین دامنه نوسانات سرعت و گشتاور و ارتباط آنها با پارامترهای ژنراتور، نقطه کار، سرعت باد به صورت تحلیلی تا کنون ارائه مارمونیکی DFIG ارائه شده است و برای مؤلفههای اصلی هارمونیکی و مؤلفههای حاصل از مدولاسیون و تقابل فرکانسها در ماشین مدل نسبتاً هارمونیکیه قابل محاسبه است. دقت به دست آمده در مدلهای ارائهشده برای کاربردهای متعددی نظیر تشخیص خطا قابل استفاده و مورد نیاز است. همچنین روابط دقیق از مؤلفههای نوسانی گشتاور و سرعت ارائه مده مین

در این مقاله ابتدا روابط تحلیلی DFIG در شرایط عادی و بدون هارمونیک در استاتور و روتور بدون نوسان در بخش مکانیکی بیان شده است. سپس تأثیر و نحوه نفوذ هارمونیکها از سمت سیمپیچ روتور بررسی شده است و بعد در شرایط سینوسیبودن ولتاژ استاتور و روتور، اثر نوسانات سرعت بر هارمونیکهای جریان استاتور و روتور بررسی شده است. در ادامه یک مدل برای شرایط واقعی ژنراتور ارائه شده است که در آن نوسانات سرعت، گشتاور و مؤلفههای هارمونیکی استاتور و روتور قابل مدل سازی و محاسبه است و در انتها مدل ارائه شده با مطالعه موردی ارزیابی شده است. در این مقاله از معادلات زمانی DFIG در حالت دائم استفاده شده است و از تبدیل pd و انتقال به فضای متعامد pd استفاده نشده است.

۲- روابط تحلیل DFIG در شرایط عادی

نظر به این که مدلسازی در حوزه زمان و تحلیل مؤلفههای هارمونیکی روتور، استاتور و بخش مکانیکی مورد نظر است لازم است کلیه ولتاژها و جریانها با جزئیات فاز، دامنه و فرکانس مشخص باشند. لذا www.SID.ir

 (۱) تا (۸) برای ولتاژها و جریانهای ژنراتور القایی تغذیه دوگانه در نظر گرفته شده است

$$v_{as}(t) = V_{MS} \cos(\omega_s t + \theta_{vs})$$
$$v_{bs}(t) = V_{MS} \cos(\omega_s t + \theta_{vs} - \frac{\tau \pi}{\tau})$$
(1)

$$v_{cs}(t) = V_{MS} \cos(\omega_s t + \theta_{vs} + \frac{\tau \pi}{\tau})$$

$$v_{ar}(t) = V_{MR} \cos(\omega_r t + \theta_{vr})$$

$$v_{br}(t) = V_{MR} \cos(\omega_r t + \theta_{vr} - \frac{\pi}{r})$$
(Y)

$$v_{cr}(t) = V_{MR} \cos(\omega_r t + \theta_{vr} + \frac{\gamma \pi}{\gamma})$$

$$i_{as}(t) = I_{MS} \cos(\omega_s t + \theta_{is})$$

$$i_{bs}(t) = I_{MS} \cos(\omega_s t + \theta_{is} - \frac{\tau \pi}{\tau}) \tag{(7)}$$

$$i_{cs}(t) = I_{MS} \cos(\omega_s t + \theta_{is} + \frac{\omega_s}{\gamma})$$
$$i_{cs}(t) = I_{MS} \cos(\omega_s t + \theta_{is})$$

$$i_{br}(t) = I_{MR} \cos(\omega_r t + \theta_{ir} - \frac{\gamma \pi}{\gamma})$$
(f)

$$i_{cr}(t) = I_{MR} \cos(\omega_r t + \theta_{ir} + \frac{\gamma \pi}{\gamma})$$

$$\mathbf{v}_{s}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{as}(t) & \mathbf{v}_{bs}(t) & \mathbf{v}_{bs}(t) \end{bmatrix}^{T}$$
($\boldsymbol{\Delta}$)

$$v_r(t) = \begin{bmatrix} v_{ar}(t) & v_{br}(t) & v_{br}(t) \end{bmatrix}^T$$
(8)

$$i_{s}(t) = \begin{bmatrix} i_{as}(t) & i_{bs}(t) & i_{bs}(t) \end{bmatrix}^{T}$$

$$i_{s}(t) = \begin{bmatrix} i_{as}(t) & i_{s}(t) & i_{s}(t) \end{bmatrix}^{T}$$

$$(Y)$$

$$l_r(t) = [l_{ar}(t) \quad l_{br}(t) \quad l_{br}(t)]^r \tag{(A)}$$

در شرایط عادی می توان روابط جریانی و ولتاژی DFIG را به صورت زیر فرموله نمود [۲۵]

$$L_{s} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{L_{ms}}{r} & -\frac{L_{ms}}{r} \\ -\frac{L_{ms}}{r} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{L_{ms}}{r} \\ -\frac{L_{ms}}{r} & -\frac{L_{ms}}{r} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix}$$

$$L_{r} = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{L_{mr}}{r} & -\frac{L_{mr}}{r} \\ -\frac{L_{mr}}{r} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{L_{mr}}{r} \end{bmatrix}$$

$$(\mathbf{\hat{\gamma}})$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{L_{mr}}{r} & -\frac{L_{mr}}{r} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix}$$

$$M = \frac{rL_{sr}}{r} \times L_{lr} + L_{mr} = \frac{rL_{sr}}{r} + L_{mr} = \frac{r}{r} + \frac{r}{r}$$

$$\frac{M_{sr} - \frac{\gamma}{r}}{r} \times \begin{bmatrix}
\cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{\gamma\pi}{r}) & \cos(\theta_r - \frac{\gamma\pi}{r}) \\
\cos(\theta_r - \frac{\gamma\pi}{r}) & \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{\gamma\pi}{r}) \\
\cos(\theta_r + \frac{\gamma\pi}{r}) & \cos(\theta_r - \frac{\gamma\pi}{r}) & \cos\theta_r
\end{bmatrix} (11)$$

$$\begin{split} M_{rs} &= \frac{\Upsilon L_{rs}}{\Upsilon} \times \\ & \left[\begin{array}{ccc} \cos \theta_r & \cos (\theta_r - \frac{\Upsilon \pi}{\Upsilon}) & \cos (\theta_r + \frac{\Upsilon \pi}{\Upsilon}) \\ \cos (\theta_r + \frac{\Upsilon \pi}{\Upsilon}) & \cos \theta_r & \cos (\theta_r - \frac{\Upsilon \pi}{\Upsilon}) \\ \cos (\theta_r - \frac{\Upsilon \pi}{\Upsilon}) & \cos (\theta_r + \frac{\Upsilon \pi}{\Upsilon}) & \cos \theta_r \end{array} \right] \end{split} \tag{1Y} \\ & I'r &= r_r (\frac{N_s}{N_r})^{\Upsilon} , \quad L_{ms} = L_{sr} \frac{N_s}{N_r} , \quad L_{mr} = L_{ms} (\frac{N_r}{N_s})^{\Upsilon} \\ & L_{lr}' = L_{lr} (\frac{N_s}{N_r})^{\Upsilon} , \quad i_r' = i_r \frac{N_r}{N_s} , \quad v_r' = v_r \frac{N_s}{N_r} \end{aligned} \tag{1Y} \\ & \left[\begin{array}{c} V_{MS} e^{j(\omega_l t + \theta_{rs})} \\ V_{MR}' e^{j(\omega_l t + \theta_{rr})} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} r_s I_{MS} e^{j(\omega_l t + \theta_{ls})} \\ r_r' I_{MR}' e^{j(\omega_l t + \theta_{rr})} \end{array} \right] + \\ & \quad \frac{d}{dt} \left(\begin{array}{c} L_{ls} + \Im \frac{L_{ms}}{\Upsilon} & L_{ms} e^{j\theta_r} \\ L_{ms} e^{j\theta_r} & L_{lr}' + \Im \frac{L_{ms}}{\Upsilon} \end{array} \right) \left[\begin{array}{c} I_{MS} e^{j(\omega_l t + \theta_{ls})} \\ I_{MR}' e^{j(\omega_l t + \theta_{lr})} \end{array} \right] \right) \end{aligned}$$

چنانچه فقط نسبت تبدیل دامنه روتور به استاتور را بر اساس نسبت دورهای N_s/N_r مطابق (۱۳) لحاظ نماییم پارامترهای منتقل شده به سمت استاتور را به شرح (۱۳) خواهد بود. توجه شود که در این تبدیل و انتقال، اثر فرکانس لحاظ نشده و هر طرف در فرکانس خودش است. سپس با استفاده از تبدیل $\alpha\beta$ به (۱۴) خواهیم رسید.

در شرایط عادی سرعت مکانیکی ثابت بوده و فرض شده است با در نظر گرفتن تعداد قطبها (۱۵) و (۱۶) برقرار باشد که Ω_m سرعت مکانیکی، p تعداد قطبهای ماشین، ω_s فرکانس زاویهای استاتور، ω_r فرکانس زاویهای جریان روتور و ω_m سرعت زاویهای مکانیکی در شرایط بدون هارمونیکی هستند

$$\omega_{s} = \omega_{m} + \omega_{r}$$

$$\omega_{m} = \frac{p\Omega_{m}}{r}$$
(10)

$$\theta_r = \omega_m t + \theta_{\cdot} \tag{18}$$

در تبدیل شار روتور به سمت استاتور از (۱۷) میتوان استفاده نمود

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\psi_r^r e^{j\theta_r} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\psi_r^s - j\psi_r^s \frac{\mathrm{d}\theta_r}{\mathrm{d}t} \tag{1Y}$$

در این صورت (۱۴) با لحاظنمودن (۱۷) و تعریف لغزش بر اساس (۱۹) به صورت (۱۸) به دست میآید. در این حالت مدار معادل ماشین منتقل شده به سمت استاتور به صورت شکل ۱ است

$$\begin{bmatrix} V_{MS}e^{j(\omega_{s}t+\theta_{v_{s}})} \\ \frac{V'_{MR}e^{j(\omega_{s}t+\theta_{v_{r}}+\theta_{r})}}{S} \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} r_{s}+j(L_{ls}+\frac{r}{r}L_{ms})\omega_{s} & jL_{ms}\omega_{s} \\ jL_{ms}\omega_{s} & \frac{r'_{r}}{S}+j(L'_{lr}+\frac{r}{r}L_{ms})\omega_{s} \end{bmatrix} \times \quad (\Lambda) \\ \begin{bmatrix} I_{MS}e^{j(\omega_{s}t+\theta_{ls})} \\ I'_{MR}e^{j(\omega_{s}t+\theta_{lr}+\theta_{r})} \end{bmatrix}$$

www.SID.ir



شکل ۱: مدار معادل DFIG منتقل شده به سمت استاتور در شرایط عادی و بدون هارمونیکی در مؤلفه اصلی.

$$S = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \tag{19}$$

دامنه و فاز جریان روتور و استاتور با توجه به قانون جمع آثار نیز بر اساس (۲۰) و (۲۱) به دست می آیند

$$i_{r} = i_{vr}^{r} - i_{vs}^{r} , \quad i_{vr}^{r} = \frac{v_{r}'}{S} / Z_{r}^{eq}$$

$$Z_{r}^{eq} = \frac{r_{r}'}{S} + jx_{r}' + \frac{jx_{m}(r_{s} + jx_{s})}{r_{s} + jx_{s} + jx_{m}}$$

$$i^{r} = \frac{v_{s}}{J} - \frac{jx_{m}}{J}$$
(Y ·)

$$Z_{s}^{eq} r_{r}'/S + jx_{r}' + jx_{m}$$

$$Z_{s}^{eq} = r_{s} + jx_{s} + \frac{jx_{m}(r_{r}'/S + jx_{r}')}{r_{r}'/S + jx_{r}' + jx_{m}}$$

$$i_{s} = i_{vs}^{s} - i_{vr}^{s} , \quad i_{vs}^{s} = \frac{v_{s}}{Z_{s}^{eq}}$$

$$Z_{s}^{eq} = r_{s} + jx_{s} + \frac{jx_{m}(r_{r}'/S + jx_{r}')}{r_{r}'/S + jx_{r}' + jx_{m}}$$

$$i_{vr}^{s} = (\frac{v_{r}'}{S} / Z_{r}^{eq})(\frac{jx_{m}}{r_{s} + jx_{s} + jx_{m}})$$

$$Z_{r}^{eq} = \frac{r_{r}'}{S_{s}} + jx_{r}' + \frac{jx_{m}(r_{s} + jx_{s})}{r_{s} + jx_{s} + jx_{m}}$$
(Y1)

۳-۱ با حضور هارمونیک ولتاژ روتور و در سرعت ثابت مکانیکی

چنانچه فرض شود که ولتاژ استاتور که از طرف شبکه تزریق می شود، بدون هارمونیک است و ولتاژ روتور که از طریق مبدل سمت روتور تأمین می شود هارمونیک دارد و این هارمونیک ها مضارب صحیحی از فرکانس روتور باشند، (۱) به جای خود باقی خواهد ماند و (۲) تا (۴) به ترتیب به (۲۲) تا (۲۴) تبدیل می شوند

$$\begin{aligned} v_{ar}'(t) &= \sum_{h=v}^{\infty} V_{MRh}' \cos(h\omega_r t + \theta_{vrh}) \\ v_{br}'(t) &= \sum_{h=v}^{\infty} V_{MRh}' \cos(h\omega_r t + \theta_{vrh} - \frac{\tau\pi h}{\tau}) \end{aligned} \tag{YY} \\ v_{cr}'(t) &= \sum_{h=v}^{\infty} V_{MRh}' \cos(h\omega_r t + \theta_{vrh} + \frac{\tau\pi h}{\tau}) \\ i_{as}(t) &= \sum_{h=v}^{\infty} I_{MSh} \cos(\omega_{ish} t + \theta_{isha}) \\ i_{bs}(t) &= \sum_{h=v}^{\infty} I_{MSh} \cos(\omega_{ish} t + \theta_{ishb}) \end{aligned} \tag{YY}$$



$$i'_{ar}(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I'_{MRh} \cos(\omega_{irh}t + \theta_{irha})$$

$$i'_{br}(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I'_{MRh} \cos(\omega_{irh}t + \theta_{irhb}) \qquad (\Upsilon f)$$

$$i'_{cr}(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I'_{MRh} \cos(\omega_{irh}t + \theta_{irhc})$$

لازم به ذکر است که برای امکان مدل نمودن زیرهارمونیکها و هارمونیکها ی هارمونیکهای میانی در جریان روتور و جریان استاتور، فرکانس زاویه ای آنها به صورت ضریب صحیحی از فرکانس اصلی روتور $(h\omega_r)$ و استاتور ($h\omega_s$) مدل نشده و فرکانسهای مختلف جریانهای استاتور به صورت ω_{ish} و روتور به صورت ω_{ish}

در تبدیل $\alpha\beta$ مؤلفههای چپگرد و راستگرد رفتار متفاوتی دارند که در بخش ۱ پیوست به آن اشاره شده است. همچنین اگر زوایای مؤلفههای مختلف فرکانسی جریانهای abc با هم مضرب صحیحی از π/π با هم اختلاف نداشته باشند، نمی توان از تبدیل $\alpha\beta$ استفاده نمود. یعنی در هر مؤلفه فرکانسی برای جریان روتور باید θ_{irha} و θ_{irh} با هم دو به دو اختلاف مضرب صحیحی از π/π داشته باشند و همین طور نوبه دو اختلاف مضرب صحیحی از π/π داشته باشند و همین طور که همواره زاویههای سه فاز مضرب صحیحی از π/π با هم که همواره زاویههای سه فاز مضرب صحیحی از π/π با هم دارند و لذا می توان از تبدیل $\alpha\beta$ استفاده نمود.

با توجه به موارد مطرحشده می توان (۱۴) را در شرایط هارمونیکی به صورت (۲۵) نوشت. البته به دلیل این که مؤلفه های هارمونیکی جریان استاتور و روتور از نظر چپ گرد و راست گرد مشخص نیستند به صورت کلی نوشته شدهاند ولی باید ملاحظات چپ گرد و راست گرد آنها را مطابق (پ– ۱) پیوست در نظر داشت. چنانچه اصل جمع آثار هارمونیکی را بپذیریم، باید بر اساس آن در دو طرف تساوی مؤلفه های هارمونیکی یکسان وجود داشته باشد و مؤلفه های یکسان را می توان به صورت مستقل در تساوی های جداگانه در نظر گرفت

$$\begin{bmatrix} V_{MS}e^{j(\omega_{st}t+\theta_{vs})} \\ \sum_{h=v}^{\infty} V'_{MRh}e^{j(h\omega_{r}t+\theta_{vrh})} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{s}\sum_{h=v}^{\infty} I_{MSh}e^{j(\omega_{ish}t+\theta_{ish})} \\ r'_{r}\sum_{h=v}^{\infty} I'_{MRh}e^{j(\omega_{irh}t+\theta_{irh})} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{\Psi L_{ms}}{\Psi} & L_{ms}e^{j\theta_{r}} \\ L_{ms}e^{j\theta_{r}} & L'_{lr} + \frac{\Psi L_{ms}}{\Psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum_{h=v}^{\infty} I'_{MSh}e^{j(\omega_{ish}t+\theta_{ish})} \\ \sum_{h=v}^{\infty} I'_{MRh}e^{j(\omega_{irh}t+\theta_{irh})} \end{bmatrix}$$
(YA)

لذا می توان نتیجه گرفت که بر اساس (۲۵) و استفاده از تبدیل (۱۷) هارمونیکهای ولتاژ روتور باعث ایجاد هارمونیکهایی مشابه در جریان روتور خواهند شد و این به مفهوم برقراری (۲۶) است و بر اساس (پ-۲) و (پ-۳) در پیوست، رابطه بین هارمونیکهای جریان استاتور به صورت (۲۷) خواهد بود که ω_m همان سرعت زاویهای مکانیکی در شرایط بدون هارمونیکی است

جدول ۱: اثر هارمونیکهای چپگرد و راستگرد. h ۱ ۲ ۳ ۴ ۵

 h_s) -r , r

$$\omega_{irh} = h\omega_r \tag{19}$$

۵–

$$\omega_{ish} = \omega_{irh} + \omega_{m}.$$
 (YY)

این نتیجه به دست می آید که در این شرایط در جریان روتور فقط هارمونیکهای موجود در ولتاژ روتور ایجاد می شود و در جریان استاتور هارمونیکهای $h_s \omega_r + \omega_m$ ایجاد می شود. در شبیه سازی دقیقاً چنین حالتی نیز به دست آمد. البته مقدار h_s در این رابطه بر اساس راست گرد و چپ گرد بودن طبق جدول ۱ است

$$S_{h} = \frac{\omega_{ish} - \omega_{m.}}{\omega_{ish}} = \frac{h_{s}\omega_{r}}{h_{s}\omega_{r} + \omega_{m.}}$$
(YA)

با تعریف لغزش هارمونیک به صورت (۲۸) میتوان مدار معادل در هر مؤلفه هارمونیکی به غیر از مؤلفه اصلی را به صورت شکل ۲ در نظر گرفت. بدیهی است مدار معادل مؤلفه اصلی به صورت شکل ۱ است. با این مدل میتوان توابع تبدیل $i_{rh}(S)/v_{rh}(S)$ و $i_{sh}(S)/v_{rh}(S)$ را به دست آورد.

$$i_{r} = i_{vrh}^{r}$$

$$i_{vrh}^{r} = \frac{v_{vrh}^{\prime}}{S_{h}} / Z_{r}^{eq} \qquad (\Upsilon^{q})$$

$$Z_{r}^{eq} = \frac{r_{r}^{\prime}}{S_{h}} + jx_{r}^{\prime} + \frac{jx_{m}(r_{s} + jx_{s})}{r_{s} + jx_{s} + jx_{m}}$$

$$i_{s} = -i_{vrh}^{s}$$

$$i_{vrh}^{s} = \left(\frac{v_{r}^{\prime}}{S_{h}} / Z_{r}^{eq}\right) \frac{jx_{m}}{r_{s} + jx_{s} + jx_{m}} \qquad (\Upsilon^{\bullet})$$

۲-۳ نوسان سرعت و بدون حضور هارمونیک ولتاژ روتور و ولتاژ استاتور

در این حالت فرض شده که ولتاژهای استاتور و روتور سینوسی خالص هستند ولی سرعت ژنراتور دارای نوسان است. البته این وضعیت در حالت کنترل سرعت و یا موارد خاص پیش میآید و به دلیل سینوسی بودن ولتاژهای استاتور و روتور نوسان سرعت مکانیکی باید منشأ دیگری نظیر باد داشته باشد. این تحلیل به منظور بررسی اثر مستقل نوسان سرعت مکانیکی در نظر گرفته شده و مشابه شرایط عملی نیست. در این صورت (۱۶) معتبر نخواهد بود و چنانچه سرعت مکانیکی را با یک مؤلفه نوسانی در نظر بگیریم (۱۶) به (۳۱) تبدیل می شود

$$\omega_m = \omega_{m.} + A_{\omega m} \sin(\omega_{mr} t + \alpha_{mr}) \tag{(11)}$$

$$\theta_{r} = \int \omega_{m} dt = \omega_{m.} t - \frac{A_{\omega m}}{\omega_{mr}} \cos(\omega_{mr} t + \alpha_{mr})$$
(TY)

در تبدیل $\alpha\beta$ توابع کسینوس در (۱۱) و (۱۲) به $e^{j\theta_r}$ تبدیل می شوند ولی با توجه به (۳۱) باید بررسی مجددی صورت گیرد. برای این منظور با فرض (۳۳) $\cos(\omega_{mr}t + \alpha_{mr}) \cos(\omega_{mr}t + \alpha_{mr})$ می توان از تخمین (۳۳) و (۳۴) استفاده نمود و (۳۵) را به دست آورد



شکل ۲۰ مدار معادل برای ژنراتور با یک مؤلفه هارمونیک در ولتاژ روتور و امکان نوسان N_s/N_r سرعت مکانیک، (الف) مدار معادل منتقل شده در سمت استاتور با نسبت تبدیل در سرعت مکانیکی (الف) مدار معادل منتقل شده در سمت استاتور با نسبت تبدیل در سرعت مکانیکی ω_m . (ب) مدار معادل منتقل شده در سمت $|KT| N_s/N_r$ و (ج) مدار معادل منتقل شده در سمت استاتور با نسبت تبدیل استاتور با نسبت تبدیل در سمت محانیکی $\omega_m - \omega_m - \omega_m$.

طبق (۳۷) تا (۳۹) ضرایب K۱ تا K۳ و M۱ تا M۳ دامنه و فاز دارند. دامنه و فاز این ضرایب در (۱۷) در تبدیل کمیتهای روتور به استاتور و بالعکس تأثیر دارد به این صورت که فاز ضرایب K۱ تا K۳ و M۱ تا M۳ رابطه انتقال مؤلفه های فرکانسی استاتور به سمت روتور و بالعکس را مشخص مینماید و تبدیل دامنه مؤلفههای متناظر جریان و ولتاژ و امپدانسها از استاتور به روتور و بالعکس به نسبت دامنههای ضرایب K۱ تا K۳ و M۱ تا M۳ انجام می شود. لذا می توان مدار شکل ۳ را بر اساس اصل جمع آثار و استقلال هارمونیکی به سه مدار به صورت شکل ۴ در نظر گرفت که شکل ۴- الف همان مدار معادل ژنراتور در شرایط عادی با مؤلفههای اصلی است که در شکل ۱ نشان نیز نشان داده شده و با ضرایب K۱ و M۱ با هم کوپل شدهاند. در شکلهای ۴- ب و ۴- ج فرکانس های ایجادشده در استاتور به علت نوسان سرعت مکانیکی نشان داده شده که در این شکلها Sx لغزش محاسبه شده بر حسب مؤلفه های فرکانسی $\omega_{m.} + \omega_{m.}$ و $\omega_{m.} - \omega_{mr}$ هستند. در این مدار معادلها پارامترهای روتور به سمت استاتور علاوه بر لحاظنمودن (۱۳) مقادیر فرکانسی و دامنه ای (۳۸) و (۳۹) نیز باید لحاظ شود.

در شکل ۴ فقط مؤلفههای موجود در (۳۶) لحاظ شده است. باید توجه داشت که با توجه به تقریب (۳۳) و (۳۴) فقط مؤلفههای $-\omega_m$ و $\omega_m + \omega_{mr}$ در این مدل به دست آمده است. مؤلفههای بزرگتر برای $m_m + \omega_m$ در رابطه $\omega_m \pm h_m \omega_m$ و $m_m + \omega_m + \omega_m$ برگتر برای (۳۳) و (۳۴) به دست میآیند که دامنههای خیلی کوچکی دارند. رابطه (۳۱) و (۳۴) به دست میآیند که دامنههای خیلی کوچکی دارند. رابطه و (۳۲) نوشت که باید در آن ضرایب تبدیل فرکانسی و دامنهای (۳۸) و (۳۹) را لحاظ نمود. میتوان اثبات نمود که در صورت وجود مؤلفههای بیشتر در نوسان سرعت مکانیکی، مضارب صحیحی از ترکیبهای مختلف این فرکانسها در مدلها و روابط بیانشده ظاهر میشوند.



شکل ۳: مدار معادل برای حالتی که فقط سرعت نوسان دارد.

$$\cos(\frac{A_{\omega m}}{\omega_{mr}}\cos(\omega_{mr}t+\alpha_{mr})) \simeq v \tag{(YY)}$$

$$\sin(\frac{A_{\omega m}}{\omega_{mr}}\cos(\omega_{mr}t+\alpha_{mr})) \simeq \frac{A_{\omega m}}{\omega_{mr}}\cos(\omega_{mr}t+\alpha_{mr}) \qquad (\Upsilon \ell)$$

$$\cos\theta_r = \cos(\omega_{m.}t + \theta_{.} - \frac{A_{\omega m}}{\omega_{mr}}\cos(\omega_{mr}t + \alpha_{mr})) =$$

$$\cos(\omega_{m.}t+\theta_{.})+\frac{A_{\omega m}}{\tau\omega_{mr}}\cos(\omega_{m.}t+\theta_{.}+\omega_{mr}t+\alpha_{mr}-\frac{\pi}{\tau}) (\tau \Delta)$$

$$+ \frac{A_{\omega m}}{\tau \omega_{mr}} \cos(\omega_{m.}t + \theta_{.} - \omega_{mr}t - \alpha_{mr} - \frac{\pi}{\tau})$$
ر نتیجه عبارت در (۲۵) به (۲۵) بیدیل می شود
$$e^{j\theta_{r}} = e^{j(\omega_{m.}t + \theta_{.})} + \frac{A_{\omega m}}{\tau \omega_{mr}} e^{j(\omega_{m.}t + \theta_{.} + \omega_{mr}t + \alpha_{mr} - \frac{\pi}{\tau})} +$$
(۳۶)

 $au \omega_{mr}$ مشاهده می شود اگر سرعت مکانیکی نوسان ω_{mr} داشته باشد در تبدیل و انتقال مؤلفه های هارمونیک از روتور به استاتور و بالعکس علاوه بر فرکانس ω_{m} مؤلفه های $\omega_{mr} + \omega_m$ و $\omega_{m} - \omega_m$ نیز تأثیر دارند. شبیه سازی نشان می دهد در این حالت در جریان روتور مؤلفه های هارمونیکی نشان می دهد در این حالت در جریان روتور مؤلفه های هارمونیکی نوسانی می شود. در نتیجه می توان گفت در صورتی که بخش مکانیکی نوسانی شود کلیه مؤلفه های جریان استاتور و جریان روتور به اندازه مضارب صحیحی از فرکانس نوسان مکانیکی جابه جا می شوند.

 $j(\omega_m t + \theta_{\cdot} - \omega_{mr} t - \alpha_{mr} - \frac{\pi}{\tau})$

مطابق (۳۶) مدار معادل ژنراتور به صورت شکل ۳ خواهد بود. در مدار مثال فوق ضرایب K۱ تا K۳ و M۱ تا M۳ بر اساس بخشهای (۳۶) هستند که همان رابطه ترانسفورماتوری میدان مغناطیسی چرخان روتور است که هم بر دامنه و هم بر فرکانس تأثیر میگذارد

$$K_{N} = I_{s} e^{j\omega_{m,t+\theta_{s}}}$$

$$M_{N} = \frac{E_{r}}{e^{j\omega_{m,t+\theta_{s}}}}$$
(**Y)

$$K \tau = \frac{A_{om}}{\tau \omega_{mr}} e^{j(\omega_{m}, t+\theta_{r}+\omega_{mr}-\frac{\pi}{\tau})}$$

$$M\gamma = \frac{\gamma}{\frac{A_{\omega m}}{\gamma \omega_{mr}}} e^{j(\omega_{m}t+\theta_{r}+\omega_{mr}t+\alpha_{mr}-\frac{\pi}{\gamma})}$$

$$A = \frac{j(\omega_{m}t+\theta_{r}-\omega_{mr}t+\alpha_{mr}-\frac{\pi}{\gamma})}{j(\omega_{mr}t+\theta_{r}-\omega_{mr}t+\alpha_{mr}-\frac{\pi}{\gamma})}$$
(11)

$$K \mathfrak{r} = \frac{\omega_{mr}}{\mathfrak{r}\omega_{mr}} e^{\mathfrak{r}}$$

$$M \mathfrak{r} = \frac{\mathfrak{r}}{\frac{A_{om}}{\mathfrak{r}\omega}} e^{j(\omega_{m}.t+\theta_{.}-\omega_{mr}t-\alpha_{mr}-\frac{\pi}{\mathfrak{r}})}$$
(٣٩)

www.SID.ir



شکل ۵: روند تولید و گسترش مؤلفههای هارمونیکی از سمت ولتاژ روتور.

۳-۳ با حضور هارمونیک ولتاژ روتور و امکان نوسان سرعت

در حالت واقعی ژنراتور از طریق جعبه دنده و پرههای توربین متصل است و ولتاژ استاتور که از طرف شبکه تزریق می شود، بدون هارمونیک است و ولتاژ روتور که از طریق مبدل سمت روتور (RSC) تأمین می شود، هارمونیک دارد و این هارمونیک ها مضارب صحیحی از فرکانس روتور هستند، در این حالت سرعت نیز نوسان پیدا می نماید. در بخش مکانیکی هم سرعت و هم گشتاور نوساناتی خواهند بود، لذا در این بخش نوسانات سرعت تحلیل شده است. سپس دامنه نوسانات سرعت تحلیل شده و نیز مؤلفههای فرکانسی و دامنه نوسانات گشتاور نیز به دست آمده است.

این حالت در عمل ترکیبی از نتایج حالت اول و دوم است که می توان از آنها استفاده نمود. در این حالت (۱) به جای خود باقی خواهد ماند و (۲) تا (۴) به ترتیب به (۲۲) تا (۲۴) تبدیل می شوند و (۱۴) به صورت (۲۵) نوشته می شود و به طور مشابه حالت قبل باید همواره (۴۰) برقرار باشد $\omega_{ish}t = \omega_{rsh}t + \theta_r$ (۴۰)

با تعریف $\Delta \omega_{rh} = \omega_{rh} - \omega_{r.}$ مؤلفههای فرکانسهای روتور و سرعت به صورت (۴۱) و (۴۲) خواهند بود

$$\omega_{sh} = \omega_{s.} \pm K \Delta \omega_{rh} \tag{(4)}$$

$$\omega_{mh} = \omega_{m.} \pm M \Delta \omega_{rh} \tag{(47)}$$

در صورتی که فقط مؤلفه تحریک ω_{r} وجود داشته باشد M = M بوده و در صورتی که فقط مؤلفه تحریک ω_{rh} وجود داشته باشد (+M = M = M) و است. مطابق حالتهای اول در جریان روتور فقط مؤلفههای هارمونیکی مطابق با مؤلفههای هارمونیکی ولتاژ روتور ایجاد می شود و به این دلیل مطابق حالت دوم، در جریان روتور مؤلفههای هارمونیکی ناشی از نوسانان مکانیکی ایجاد نمی شوند که نوسانات مکانیکی در این حالت ناشی از هارمونیکهای روتور است.

در صورتی که ولتاژ روتور مؤلفههای هارمونیک بیشتری به شرح در صورتی که ولتاژ روتور مؤلفههای هارمونیک بیشتری به شرح $\omega_{r,\cdot}, \omega_{r,\cdot}, \omega_{r,\cdot}, \dots$ داشته باشد، فرکانسهای هارمونیکی جریان استاتور و سرعت مکانیکی به صورت (۴۹) و (۴۵) خواهند بود. در صورتی که منبع تحریک در مدار معادل شکل $m_{r,\cdot}$ باشد M = M + 1 بوده و در صورتی که منبع تحریک منبع تحریک ω_{ri} باشد M = M + 1 است

$$\Delta \omega_{rhi} = \omega_{ri} - \omega_{r.} \quad , \quad i = 1, \gamma, \dots$$
 (FT)

$$\omega_{sh} = \omega_{s.} \pm K \Delta \omega_{rhi} \quad , \quad i = 1, 7, \dots$$
 (ff)

$$\omega_{sm} = \omega_{s.} \pm M \Delta \omega_{rhi} \quad , \quad i = 1, 7, \dots$$
 (FD)

www.SID.ir

۳-۶ وجود مؤلفههای هارمونیکی در ولتاژ استاتور

در سه حالت فوق همواره فرض شده که ولتاژ استاتور بدون هارمونیک است. در شرایطی که ولتاژ استاتور نیز از طرف شبکه هارمونیک داشته باشد میتوان از تمام سه حالت فوق به طور مشابه استفاده نمود زیرا که رفتار سیمپیچ استاتور مشابه سیمپیچ روتور بوده و میتوان از اصل جمع آثار استفاده نمود. یعنی اگر فقط ولتاژ استاتور دارای هارمونیک باشد و ولتاژ روتور هارمونیک نداشته باشد و سرعت نیز ثابت باشد، اول آن که در جریان استاتور همان مؤلفههای موجود در ولتاژ استاتور وجود خواهد داشت و دوم آن که در جریان روتور مؤلفههایی هارمونیکی برابر خواهد داشت. $-\omega_m = h\omega_s - \omega_m$.

٤- محاسبه نوسانات گشتاور الکتریکی و مکانیکی

مطابق شکل ۵ جهت محاسبه گشتاور، دامنه، فرکانس و نوسانات آن باید سه مرحله را در نظر گرفت:

الف) تبدیل جریانهای استاتور و روتور به گشتاور الکتریکی ب) رابطه گشتاور الکتریکی و مکانیکی با سرعت در بخش مکانیکی ج) رابطه گشتاور مکانیکی و سرعت در پرهها و مدل باد

٤-۱ تبدیل جریانهای استاتور و روتور به گشتاور الکتریکی

چنانچه فرض شود گشتاور مطابق (۴۶) از مؤلفههای مختلف هارمونیکی (نوسانی) تشکیل شده باشد، هر مؤلفه $T_{h_{\tau}}$ بر اساس روابط ماشین به صورت (۴۷) محاسبه می شود که باید شرط (۴۸) برقرار باشد

$$T_{e} = \sum_{h_{r}=v}^{\infty} T_{h_{r}} \sin(\omega_{h_{r}}t + \varphi_{h_{r}})$$

$$T_{e} = -v_{/\Delta}pL_{ms} \times \sum_{i,j} I_{si}I_{rj} \sin(\omega_{si}t - \omega_{m.}t - \omega_{rj}t + \theta_{si} - \theta_{m.} - \theta_{rj})$$

$$(\mathbf{FY})$$

$$\omega_{h_{r}} = \omega_{si} + \omega_{rj}$$

$$(\mathbf{FA})$$

برای لحاظنمودن اثر تغییرات سرعت مکانیکی از (۴۹) استفاده می شود. در حالت دایم تکسینوسی بر اساس (۲)، (۴) و (۴۹) گشتاور به صورت (۵۰) به دست می آید که مستقل از سرعت و ثابت است

$$T_{e} = \frac{\gamma}{r} \frac{p}{r} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{absr} \end{bmatrix}^{T} \begin{bmatrix} \cdot & \frac{\partial M_{sr}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial M_{rs}}{\partial \theta} & \cdot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{absr} \end{bmatrix}$$
(۴۹)

$$T_e = \frac{\Pr L_{ms}}{\Lambda} I_{MS} I_{MR} \sin(\theta_{is} - \theta_{ir})$$
 (\$\Delta\cdot)

و در صورتی که مؤلفههای جریانی استاتور و روتور را مطابق (۲۳) و (۲۴) در نظر بگیریم، بر اساس (۴۹) گشتاور الکتریکی به صورت (۵۱) به دست میآید

$$T_{e} = -\frac{\Pr L_{ms}}{\lambda} \times \sum_{h,j} I_{MSh} I_{MRj} \sin(\omega_{sih}t + \theta_{sih} - (\omega_{rij}t + \theta_{rij}) - \theta_{m}(t))$$
(A1)

$$T_{Lh}\sin(\varphi_{TLh}) = \frac{r}{p} A_{\omega m} [J\omega_{mr}\cos(\alpha_{mr}) + D\sin(\alpha_{mr})]$$
(\Delta r)
+ $T_{eh}\sin(\varphi_{Teh})$



شکل ۶۰ ژنراتور تغذیه دوگانه با یک مؤلفه هارمونیک در ولتاژ روتور و امکان نوسان سرعت مکانیکی.

۲-۲ رابطه گشتاور الکتریکی و مکانیکی با سرعت در بخشهای مکانیکی

رابطه گشتاور الکتریکی و گشتاور مکانیکی و سرعت نیز بر اساس (۵۳) است

$$J\frac{\mathrm{d}\omega_m}{\mathrm{d}t} = \frac{p}{r}(T_L - T_e) - D\omega_m \tag{\Delta 7}$$

بر اساس (۵۳) در حالت دایم و در صورت ثابت بودن سرعت، ممان اینرسی در میزان گشتاور تأثیر ندارد و بر اساس (۵۱) می توان نتیجه گرفت که دامنه های جریان در مؤلفه های مختلف فرکانسی به ممان اینرسی ربطی ندارند. چنانچه گشتاور مکانیکی را همراه مؤلفه های هارمونیکی آن به صورت (۵۴) و گشتاور الکتریکی را به صورت (۵۵) در نظر بگیریم

$$T_L = T_{L.} + T_{Lh} \sin(\omega_{TLh} + \varphi_{TLh})$$
 (Δ f)

$$T_e = T_{e.} + T_{eh} \sin(\omega_{Teh} + \varphi_{Teh})$$
 (۵۵)

با استفاده از (۵۳) تا (۵۵) و نوسان سرعت به صورت (۳۱)، (۵۶) و (۵۷) بین دامنههای گشتاور الکتریکی و مکانیکی در حالت دایم و مؤلفه هارمونیکی به دست میآید

$$T_{L.} = \frac{\tau D}{r} \omega_{m.} + T_{e.} \tag{ds}$$

$$\omega_{mr} = \omega_{TLh} = \omega_{Teh} \tag{\Delta Y}$$

در (۵۲) دامنه نوسانات سرعت مکانیکی (A_{om}) و دامنه نوسانات گشتاور (۵۲) در یک مؤلفه فرکانسی مکانیکی بیان شده است که با استفاده از (T_{Lh}) مدل باد و پرههای توربین چگونه این دو پارامتر به دست میآید

٤-۳ رابطه گشتاور مکانیکی و سرعت در پرهها و مدل باد

بخش تکمیل کننده رابطه بین گشتاور باد $(_L)$ و سرعت مکانیکی از طریق مدل بار است که در اینجا شامل جعبه دنده، پرهها و باد است. با فرض این که از طرف باد و پرهها در شرایط عادی، مؤلفه هارمونیکی وجود نداشته باشد و در حول نقطه کار خطی بگیریم میتوان قبول کرد که مؤلفههای هارمونیکی سرعت و گشتاور باد یکی است و لذا میتوان از (۵۲) نتیجه گرفت که مؤلفههای هارمونیکی گشتاور الکتریکی نیز باید همان مؤلفههای سرعت و گشتاور مکانیکی باشد.

با قبول یکسان بودن مؤلفه فرکانسی، دامنه نوسانات سرعت و گشتاور، دامنه T_{Lh} از طریق مدل باد به هم مرتبط می شوند.

چنانچه سرعتها در معادلات به صورت پریونیت در نظر گرفته شوند، اثر تبدیل سرعتها در جعبه دنده حذف می شود و چنانچه ممان اینرسی www.SID.ir

جعبه دنده را در بخش مکانیکی ژنراتور در (۵۲) در نظر گرفته شود، میتوان جعبه دنده را از معادلات حذف نمود. لذا میتوان گشتاور بار (T_L) در (۵۲) را برابر گشتاور ناشی از باد در پرهها در نظر گرفت.

مدل باد و پرههای توربین را میتوان بر اساس مدل Van der Hoven در نظر گرفت [۲۶] که بر اساس آن رابطه بین دامنه مؤلفههای فرکانسی گشتاور بار و فرکانسهای مختلف نوسان سرعت به دست میآید.

بدیهی است که دامنه گشتاور در فرکانسهای خیلی بزرگتر و خیلی کوچکتر از سرعت پایه (ϖ_{base}) مطابق با مشخصه پرهها کوچک خواهد بود.

با داشتن مؤلفههای نوسانی گشتاور (T_{Lh}) از مشخصه پرهها و در سرعت مشخص باد و حل (۵۲)، گشتاور الکتریکی (T_{eh}) متناظر با این مؤلفه فرکانسی سرعت و گشتاور به دست میآید که در نتیجه بر اساس (۵۰) یک رابطه بین مؤلفههای متناظر جریان استاتور و روتور خواهد بود و از طرفی بر اساس (۳۷) تا (۳۹) بین مؤلفههای متناظر جریان استاتور و روتور نواهد بود و روتور نیز یک رابطه وجود دارد که به دامنه نوسانات سرعت مکانیکی روتور نیز یک رابطه وجود دارد که به دامنه نوسانات سرعت مکانیکی موارد (Λ_{con}) و ایسته است. از حل این معادلات، آخرین پارامتر در شرایط هارمونیکی و نوسان سرعت به دست میآید که دامنه نوسانات سرعت مکانیکی مخاطبی میانات مرعت میآید که دامنه نوسانات مرعت مکانیکی مارمونیکی و نوسان سرعت به دست میآید که دامنه نوسانات مرعت مکانیکی است.

٥- مدل نهایی بر اساس روابط تحلیلی

جمع بندی کلی این است که در شرایط ژنراتوری و با حضور ولتاژ هارمونیکی در منبع متصل به روتور، نشر هارمونیکها به این صورت است که ولتاژ روتور در سیمپیچ روتور همان مؤلفههای هارمونیکی موجود در ولتاژ روتور را ایجاد میکند. این مؤلفههای هارمونیکی باعث ایجاد مؤلفههای هارمونیکی در جریان استاتور و سرعت مکانیکی میشوند. سپس مؤلفههای جریانی استاتور و روتور ایجاد مؤلفههای گشتاور الکتریکی نموده و باعث میشوند بر اساس رفتار توربین و پرهها نوسانات مکانیکی مشاهده میشود که مشخصه پرههای توربین، سرعت باد، نقطه کار و نسبت جعبه دنده همگی در بخش توربین و باد قابل محاسبه است و بین مؤلفههای یکسان نوسان گشتاور و سرعت رابطه برقرار است. با توجه به کوچکبودن دامنه نوسانات میتوان مدل این دو بخش را خطی حول نقطه کار دانست.

برای آن که در صورت وجود دامنه مشخصی از هارمونیک در ولتاژ روتور، به صورت دقیق و تحلیلی دامنه نوسان سرعت مکانیکی محاسبه گردد یا به تعبیر دیگر در صورت داشتن منبع هارمونیکی به میزان مشخصی در روتور، میزان انتشار و سهم استاتور و سرعت محاسبه شود، باید روابطی بر حسب نقطه کار، امپدانسها و عوامل دیگر داشت. لذا باید دو نتیجه زیر از بخشهای قبلی را در نظر گرفت:

- ۱) اثر یک مؤلفه فرکانسی در ولتاژ روتور به صورت شکل ۲ قابل محاسبه است.
- ۲) در صورت حضور یک نوسان در سرعت مدار معادل به صورت شکل ۳ خواهد بود.

ژنراتور تغذیه دوگانه در حالتی که روتور دارای مؤلفههای ولتاژی اصلی V_{rh} و فقط یک مؤلفه هارمونیکی با دامنه V_{rh} با فرکانس σ_{rh} و فقط یک مؤلفه هارمونیکی با دامنه V_{rh} با فرکانس σ_{rh} است و سرعت مکانیکی نوسانی به صورت (۳۱) داشته باشد در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۲: سه مدار مستقل از شش مدار معادل برای شکل ۶ برای مؤلفههای هارمونیکی ولتاژ روتور، (الف) منتقل شده در سمت استاتور با نسبت تبدیل N_s/N_r در سرعت مکانیکی . m_s/N_r در سرعت استاتور با نسبت تبدیل $|KT|N_s/N_r|$ در سرعت مکانیکی . m_m ، (ب) منتقل شده در سمت استاتور با نسبت تبدیل سرعت مکانیکی . $m_m - \omega_m$.

باید یادآوری کرد که مدار معادل حالت فوق با صرف نظر از مؤلفههای بالاتر سرعت مکانیکی طبق (۳۳) و (۳۴) به صورت شکل ۷ به دست میآید. همچنین در مدار معادل شکل ۶ مؤلفههای فرکانسی متعددی به صورت رفت و برگشت در استاتور ایجاد می شود که اگر از این مؤلفهها نیز صرف نظر گردد، مدار معادل شکل ۶ به صورت شش مدار مستقل بر صرف نظر گردد، مدار معادل شکل ۶ به صورت شش مدار مستقل بر ماس اصل جمع آثار و استقلال هارمونیکی به دست میآیند که سه مدار مربوط به فرکانس اصلی ۲ مورت شکل ۷ مورت شکل ۶ مولفهها نیز موافهها مدار معادل شکل ۶ مورت شرف و معارت شش مدار مستقل بر صرف نظر گردد، مدار معادل شکل ۶ مورت شش مدار مستقل بر مربوط به فرکانس اصلی مورت شکل ۴ خواهند بود و سه مدار دیگر به صورت شکل ۴ خواهند بود و مواه مدار دیگر به صورت شکل ۶ مورت می مول

سه مدار نشان داده شده در شکل ۴ و سه مدار نشان داده شده در شکل ۷ از هم مستقل هستند و برای هر یک میتوان (۱۴) و (۱۸) را استفاده نمود که لغزش آنها با هم متفاوت است. با توجه به این که حالت ژنراتوری مورد نظر است و توان مکانیکی مثبت است و همچنین این که سرعت زاویه ای روتور بر اساس فرض مسئله مشخص است و سرعتهای مکانیکی بر اساس (۴۱) و (۴۲) در شش مدار معادل ارائه شده لغزش و فرکانس استاتور مشخص است. بر اساس (۵۰) و (۵۱) میتوان در هر فرکانس و لغزش مشخص، گشتاور را محاسبه نمود.

از طرفی بر اساس مدل باد و پرههای توربین، در هر سرعت باد و در هر سرعت، گشتاور خاصی از باد و پرهها را میتوان انتظار داشت و لذا میتوان نتیجه گرفت که در هر مؤلفه فرکانسی سرعت مکانیکی بر اساس مشخصه باد و پره، گشتاور خاصی تولید میشود که این گشتاور بر اساس (۵۱) متناسب با دامنههای جریان استاتور و روتور است که در اینجا پارامتر مسم در (۳۱) ظاهر میشود. یعنی برای سرعت مکانیکی مشخص، دامنه نوسان سرعت به مشخصه باد و میزان گشتاور تولیدی بستگی دارد. WWW.SID.ir

ای شبیهسازی.	ژنراتور بر	ت توربين و	، ۲: مشخصاً	جدول
--------------	------------	------------	-------------	------

Rs	1/982Fe-T	pu in stator side	
Rr	1/9+9e −۲	pu in stator side	
Lls	₩/٩Ye -۲	Pu in stator side	
Llr	۳/۳۹e –۵	pu in stator side	
Lm	١/٣۴۵	Pu in stator side	
FrqS	۵۰	Hertz	
Vsm	۶۹۰	Volte, RMS	
Vrm	۶۹۰	Volte, RMS in stator side	
Pn	۲e۶	Watt	
J	۹/۵۲۶e –۲	Inertia constant (Sec)	
Р	٢	pole pairs	

٦- ارزیابی نتایج با شبیهسازی- مطالعه موردی

در این بخش نتایج تحلیلی ارائه شده با مدل شبیه سازی شده در نرم افزار Simulink/Matlab مقایسه شده است و صحت و دقت مدل و روابط ارائه شده، آزموده شده است. برای شبیه سازی از مدل ژنراتور و توربین با مقادیر جدول ۲ استفاده شده است.

در ادامه صحت تحلیلهای ارائهشده در بخشهای قبل به ترتیب از طریق شبیهسازی ارزیابی گردیده است.

۱-٦ با حضور هارمونیک ولتاژ روتور و در سرعت ثابت مکانیکی

در ابتدا شبیه سازی با یک مؤلفه هارمونیکی در ولتاژ روتور انجام شده است که به شرح جدول ۳ نتایج مطابق با تئوری ارائه شده طبق (۲۶) و (۲۷) به دست آمد. نکته جالب به دست آمده تأثیر هارمونیک های چپ گرد و راست گرد است که در جدول و نتایج شبیه سازی دقیقاً مشاهده می شود.

دامندهای هارمونیکی ولتاژ روتور به اندازه $v'_{nn} = v'_{nn}/h$ در نظر گرفته شده است. در واقع فرض شده که مؤلفههای هارمونیک به نسبت عکس مؤلفه مورد نظر هستند. یعنی مؤلفه پنجم هارمونیک ولتاژ روتور، یک پنجم مؤلفه اصلی است. فرض بعدی موضوع چپ گرد و راست گرد بودن هارمونیک ها و تأثیر آن بر لغزش است که مطابق جداول ۳ و ۴ این کار صورت گرفته و لغزش در فرکانس اصلی برابر ۲۰۴۴ فرض شده است.

از جدول ۴ ملاحظه میشود که لغزش مثبت و منفی میشود و از طرفی دامنه آن نیز بزرگ میشود به نحوی که در فرکانسهای بزرگ هارمونیکی روتور، لغزشهای بزرگتر از یک نیز به دست میآید که این موضوع مطابق (۲۸) است. به ظاهر به دلیل نبودن اتصال زمین و آرایش ستاره در سیمپیچ روتور، مؤلفههای هارمونیکی سوم ولتاژ (در صورت وجود در ولتاژ روتور) باعث برقراری مؤلفههای سوم جریان نمیشوند و میتوان آنها را صفر در نظر گرفت.

۲-۲ نوسان سرعت و بدون حضور هارمونیک ولتاژ روتور و ولتاژ استاتور

در این حالت سرعت مکانیکی نوسان داشته و منابع ولتاژ استاتور و روتور به صورت سینوسی در نظر گرفته شدهاند. مؤلفههای جدول ۵ بر اساس روابط تحلیلی ارائهشده در بخش قبل به دست آمدهاند.

مشاهده می شود دامنه و مؤلفه های محاسباتی جدول ۵ با نتایج شبیه سازی شکل های ۸ و ۹ دقت کامل را دارند.



جدول ۳: مؤلفه های هارمونیکی استاتور ناشی از مؤلفه های روتور در سرعت ثابت مکانیکی در $f_r = 4$ ، $f_r = 4$ و $f_s = 40$

	هارمونیکی هفتم راستگرد		ھارمونیکی پنجم چپگرد	
مقايسه	روابط تحليلي	شبيەسازى	روابط تحليلي	شبيەسازى
تزریقی در روتور	$\lambda \chi = \chi \chi$	77	$-\Delta \times F = -F \cdot$	-7+
ایجادشده در استاتور	$Y \times F + FF = YF$	٧۴	$-\Delta imes F + FF = FF$	78
لغزش	۰/۳۷۸		-+,∀۶	

جدول ۵: مؤلفههای فرکانسی بر اساس روابط تحلیلی در حالت نوسان سرعت مکانیکی در $f_s=$ ۹ و $f_s=$ ۹ .

فركانس هارمونيكي	
$f_{mr} = \mathbf{T}\mathbf{T}$	اعمالی به مکانیکی
,-4.,-11,4,78,41,	ایجادشده در روتور
,۶,۲۸,۷۲,۹۴,	ایجادشده در استاتور

جدول ۶۰ مؤلفههای فرکانسی سرعت، گشتاور، جریان استاتور و روتور و دامنههای آنها بر اساس روابط تحلیلی.

مؤلفههای فرکانسی	-
, ۴ Hz, ۲ •Hz,۲۸Hz,	جريان روتور
, 7 ۶Hz, ۵ •Hz,۶۴Hz,	جريان استاتور
• (Main Speed) ۲۴ Hz	سرعت مکانیکی
• (Main Torque) ۲۴ Hz, ۴۸ Hz	گشتاور مکانیکی

تغذیه دوگانه در یک توربین بادی ارائه شده است. توسط این مدل مشخصات دقیق مؤلفههای فرکانسی در استاتور، روتور و در بخش مکانیکی به صورت همزمان قابل محاسبه است. همچنین به دلیل ارائه گام هگام مدل تهیه شده، منشأ کلیه مؤلفه های هارمونیکی در سه بخش استاتور، روتور و مکانیکی مشخص است و عوامل مؤثر بر دامنه و فرکانس هر یک به صورت تحلیلی ارائه شده است. مقایسه نتایج شبیه سازی نشان دهنده کارایی بسیار خوب مدل ارائه شده است.

به دلیل این که در این مقاله همه روابط تحلیلی بر اساس روابط زمانی به دست آمدهاند، برای تحلیل و بررسی حالتهای گذرای استاتور، روتور و بخش مکانیکی، مدل ارائهشده دقیق و کاربردی است. نتایج ارزیابی مدل ارائهشده، نشاندهنده کارایی مدل برای محاسبه مؤلفههای فرکانسی در سیمپیچهای الکتریکی و مؤلفههای نوسانی در سرعت و گشتاور الکتریکی است.

پيوست

پ-۱ رفتار مؤلفههای هارمونیک در تبدیل βα

رابطه (۲۲) در تبدل lphaeta به (پ– ۱) تبدیل می شود. مشاهده می شود که تبدیل lphaeta برای مؤلفههای چپ گرد و راست گرد رفتار متفاوتی دارد

جدول ۴: مؤلفههای هارمونیکی استاتور ناشی از مؤلفههای روتور در سرعت ثابت مکانیکی $f_s = 6 \cdot f_m = 48$. در $f_s = 6 \cdot f_m = 48$

	پنجم	چهارم	دوم	اصلى	هارمونيک
	-7.	۳۲	-λ	۴	روتور
	48	48	45	48	مكانيكي
	75	Y٨	۳۸	۵۰	استاتور
	-•,YY	+٠/۴١	-•/Y1	+•,• \	لغزش
N	1		1.	1	0-7-

٦-۳ با حضور هارمونیک ولتاژ روتور و امکان نوسان سرعت

در این حالت یک توربین کامل همراه با مدل باد و پرهها شبیهسازی شده است. این شبیهسازی مطابق دادههای جدول ۲ است. در لغزش ۰/۹۲ است و تزریق ولتاژ روتور به صورت یک منبع سینوسی شامل مؤلفه اصلی ۴ Hz و مؤلفه پنجم ۲۰ Hz– با دامنه ۴٪ مؤلفه اصلی ولتاژ روتور شبیهسازی شد که نوسانات سرعت، نوسانات گشتاور، هارمونیکهای جریان استاتور و روتور به صورت شکل ۱۰ به دست آمد و مؤلفههای فرکانسی آنها در شکل ۱۱ ترسیم می شود. در شکل ۱۱ دامنه مؤلفههای مورد نظر نشان داده شدهاند. هارمونیک پنجم در زمان Sec ۲ تزریق شده است.

در شبیهسازیها برای کاهش زمان گذرا و سریع رسیدن به حالت دائم، ممان اینرسی ژنراتور و توربین کوچک گرفته شده است. بر اساس (۴۱) و (۴۲) مؤلفههای فرکانسی سرعت، گشتاور، جریان استاتور و روتور در جدول ۶ محاسبه شده است.

مقایسه نتایج محاسبات تحلیلی جدول ۶ با شکل ۱۱ شبیهسازی شده نشاندهنده دقت بسیار خوب روابط تحلیلی و مدلهای ارائه شده است.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله روابط تحلیلی دقیق برای محاسبه هارمونیکهای استاتور، روتور و نوسانات گشتاور و سرعت ارائه شده است و به صورت دقیق این مؤلفهها از نظر فرکانس نوسان، دامنه نوسان و فاز آنها محاسبه شدهاند. مهمتر این که در این روابط عوامل مؤثر بر این مؤلفهها قابل مشاهده و ارزیابی است. همچنین مدلی با دقت خوب برای ارزیابی و تحلیل ژنراتور www.SID.t



پ–۳ جمع آثار هارمونیکی

بر اساس جمع آثار هارمونیکی میتوان مؤلفههای یکسان از نظر هارمونیک را در (۲۵) به صورت تساویهایی نوشت که در آنها در دو طرف معادله مؤلفههای هارمونیکی وجود داشته باشند. برای هر مؤلفه هارمونیک (پ-۲) به دست میآید

$$\begin{bmatrix} \cdot \\ V'_{MRh} e^{j(h\omega_{r}t+\theta_{vrh})} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{s}I_{MSh}e^{j(\omega_{ish}t+\theta_{ish})} \\ r'_{r}I'_{MRh}e^{j(\omega_{irh}t+\theta_{vrh})} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left(\begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{\Psi L_{ms}}{\Upsilon} & L_{ms}e^{j\theta_{r}} \\ L_{ms}e^{j\theta_{r}} & L'_{lr} + \frac{\Psi L_{ms}}{\Upsilon} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{MSh}e^{j(\omega_{ish}t+\theta_{ish})} \\ I'_{MRh}e^{j(\omega_{irh}t+\theta_{irh})} \end{bmatrix} \right)$$
(Y-\overline)

مشابه تبدیل (۱۴) به (۱۸) رابطه فوق به (پ–۳) تبدیل می گردد



مشاهده می شود که در تبدیل $\alpha\beta$ مؤلفه های هارمونیک ضریب سوم به صفر می شوند، مؤلفه های 8k+1 و 8k+1 به صورت راست گرد و مؤلفه های 8k+1 و 8k+3 به صورت چپ گرد به دست می آیند.

پ-۲ حفظ اختلاف فاز ۲π/۳ مؤلفههای مختلف فرکانسی

جهت امکان استفاده از تبدیل $\alpha\beta$ باید مؤلفههای فرکانس یکسان سهفاز، اختلاف فازی به صورت مضرب صحیحی از $\gamma\pi/\pi$ داشته باشند. این موضوع در عمل چنین اتفاق میافتد زیرا اگر فرض شود منشأ فاز مؤلفههای اصلی و مؤلفههای هارمونیکی چنین اختلاف فازی را دارند، با توجه به این که تبادلهای فرکانسی بین استاتور، روتور و بخش مکانیکی روی فاز تأثیری ندارد میتوان نتیجه گرفت که شرط لازم برای استفاده از تبدیل $\alpha\beta$ برقرار است.

برای اثبات فرض فوق نیز میتوان چنین استدلال نمود که در تحلیل ارائهشده در این مقاله منشأ هارمونیکیها یک بار منبع ولتاژ روتور و در حالت دیگر نوسانات مکانیکی فرض شده است. در صورتی که منبع هارمونیکها از طرف ولتاژ روتور باشد، مؤلفههای هارمونیکی مطابق (۲۲) دارای چنین شرطی هستند و چنانچه منبع هارمونیکها و نوسانات از طرف سرعت مکانیکی باشد، با توجه به چیدمان سیم پیچهای استاتور و روتور در ماشین به صورت اختلاف فیزیکی $\pi/7$ مشاهده میشود که ولتاژها و جریانهای ناشی از نوسانات مکانیکی نیز باز اختلاف فاز مضرب صحیح از $\pi/7$ با هم خواهند داشت.

www.SID.ir

- [13] Y. Liao, L. Ran, G. A. Putrus, and K. Smith, "Evaluation of the effects of rotor harmonics in a doubly-fed induction generator with harmonic induced speed ripple," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 18, no. 4, pp. 508-515, Dec. 2003.
- [14] M. M. Kiani, Effects of Voltage Unbalance and System Harmonics on the Performance of Doubly Fed Induction Wind Generators, Ph.D. Thesis, the University of Texas at Arlington, May 2009.
- [15] J. Hu, H. Nian, H. Xu, and Y. He, "Dynamic modeling and improved control of DFIG under distorted grid voltage conditions," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 26, no. 1, pp. 163-175, Mar. 2011.
- [16] J. C. Moreira and T. A. Lipo, "Modeling of saturated ac machines including air gap flux harmonic components," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 28, no. 2, pp. 343-349, Mar./Apr. 1992.
- [17] S. Williamson and S. Djurovic, "Origins of stator current spectra in DFIGs with winding faults and excitation asymmetries," in *Proc. of IEEE Int. Electric Machines and Drives Conference, IEMDC'09*, pp. 563-570, Miami, FL, USA, 3-6 May 2009.
- [18] D. S. L. Dolan and P. W. Lehn, "Simulation model of wind turbine 3p torque oscillations due to wind shear and tower shadow," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 21, no. 3, pp. 717-724, Sep. 2006.
- [19] D. S. L. Dolan and P. W. Lehn, "Simulation model of wind turbine 3p torque oscillations due to wind shear and tower shadow," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 21, no. 3, pp. 717-724, Sep. 2006.
- [20] X. Gong, Online Nonintrusive Condition Monitoring and Fault Detection for Wind Turbines, Ph.D Thesis, Graduate College at the University of Nebraska, 2012.
- [21] IEC Std., Wind Turbine Generator Systems, Part 21: Measurement and Assessment of Power Quality Characteristics of Grid Connected Wind Turbines, 1st Ed., IEC 61400-21, Dec. 2001.
- [22] F. P. Garcia Marquez, A. M. Tobias, J. M. Pinar Perez, and M. Papaelias, "Condition monitoring of wind turbines: techniques and methods," *Renewable Energy*, vol. 46, pp. 169-178, 2012.
- [23] M. I. Martinez, G. Tapia, A. Susperregui, and H. Camblong, "Slidingmode control for DFIG rotor-and grid-side converters under unbalanced and harmonically distorted grid voltage," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 27, no. 2, pp. 328-339, Jun. 2012.
- [24] D. Shah, S. Nandi, and P. Neti, "Stator-interturn-fault detection of doubly fed induction generators using rotor-current and search-coilvoltage signature analysis," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 45, no. 5, pp. 1831-1842, Sep./Oct. 2009.
- [25] G. Abad, J. Lopez, M. A. Rodriguez, L. Marroyo, and G. Iwanski, Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation, 1st Ed., John Wiley & Sons, 2011.
- [26] I. Munteanu, A. Bratcu, N. A. Cutululis, and E. Ceang, Optimal Control of Wind Energy Systems Towards a Global Approach, Springer, ISBN 978-1-84800-079-7, 2008.

مجید نیری پور تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی الکترونیک و کارشناسی ارشد قدرت بهترتیب در سال های ۱۳۷۲ و ۱۳۷۴ از دانشگاه گیلان و صنعتی اصفهان و دکتری قدرت از دانشگاه تربیت مدرس در سال ۱۳۸۶ به پایان رسانده است و هم اکنون دانشیار دانشگاه صنعتی شیراز است. زمینههای تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: انرژهای نو، ادواتFACT و کیفیت توان.

محمد مهدی منصوری تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی الکترونیک و کارشناسی ارشد قدرت بهترتیب در سالهای ۱۳۷۷ و ۱۳۷۹ از دانشگاه صنعتی شریف و دکتری قدرت از دانشگاه صنعتی شیراز سال ۱۳۹۴ به پایان رسانده است و هماکنون کارشناس شرکت برق منطقه ای یزد است. زمینههای تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: الکترونیک قدرت، رله و حفاظت و توربینهای باد با ژنراتور القایی تغذیه دو گانه.

$$\begin{vmatrix} \cdot \\ \frac{V'_{MRh}e^{j(h\omega_{r}t+\theta_{vrh}+\theta_{r})}}{S_{h}} \end{vmatrix} = \\ \begin{bmatrix} r_{s}+j(L_{ls}+\frac{\tau L_{ms}}{\tau})\omega_{s} & jL_{ms}\omega_{s} \\ jL_{ms}\omega_{s} & \frac{r'_{r}}{S_{h}}+j(L'_{lr}+\frac{\tau L_{ms}}{\tau})\omega_{s} \end{bmatrix} (\tau - \psi) \\ \times \begin{bmatrix} I_{MSh}e^{j(\omega_{trh}t+\theta_{trh})} \\ I'_{MRh}e^{j(\omega_{trh}t+\theta_{trh}+\theta_{r})} \end{bmatrix}$$

را نتيجه ميدهد.

مراجع

- [1] B. Bose, *Modern Power Electronics and AC Drives*, Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 2002.
- [2] R. Cardenas, R. Pena, S. Alepuz, and G. Asher, "Overview of control systems for the operation of DFIGs in wind energy applications," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 7, pp. 2776-2798, Jul. 2013.
- [3] M. Liserre, R. Cardenas, M. Molinas, and J. Rodriguez, "Overview of multi-MW wind turbines and wind parks," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 4, pp. 1081-1095, Apr. 2011.
- [4] J. A. Baroudi, V. R. Dinavahi, and A. M. Knight, "A review of power converter topologies for wind generators," in *Proc. IEEE Int. Elect. Mach. Drives*, vol. 1, pp. 458-465, May 2005.
- [5] B. Kroposki, et al., "Benefits of power electronic interfaces for distributed energy systems," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 25, no. 3, pp. 901-908, Sep. 2010.
- [6] L. Fan and S. Yuvarajan, "Harmonic analysis of a DFIG for a wind energy conversion system," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 25, no. 1, pp. 181-190, Mar. 2010.
- [7] Z. M. Salameh and L. F. Kazda, "Analysis of the double output induction generator using direct three-phase model, part II-harmonic analysis," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 2, no. 2, pp. 182-188, Jun. 1987.
- [8] A. C. Smith, "Harmonic field analysis for slip-ring motors including general rotor asymmetry," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 26, no 5, pp. 857-865, Sep./Oct. 1990.
- [9] S. Schostan, K. D. Dettmann, I. Purellku, and D. Schulz, "Harmonics and powers of doubly fed induction generators at balanced sinusoidal voltages," *Przeglad Elektro Techniczny (Electrical Review)*, vol. 87, no. 1 pp. 51-55, Jan. 2011.
- [10] M. Kiani and W. J. Lee, "Effects of voltage unbalance and system harmonics on the performance of doubly fed induction wind generators," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 46, no. 2, pp. 562-568, Mar./Apr. 2010.
- [11] V. T. Phan and H. H. Lee, "Stationary frame control scheme for a stand-alone doubly fed induction generator system with effective harmonic voltages rejection," *IET Electric Power Applications*, vol. 5, no. 9, pp. 697-707, Nov. 2011.
- [12] A. Stefani, et al., "Doubly fed induction machines diagnosis based on signature analysis of rotor modulating signals," *IEEE Trans.* on *Industry Applications*, vol. 44, no. 6, pp. 1711-1721, Nov./Dec. 2008.