

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

مجید نیری پور و محمدمهدی منصوری

کلیدزنی الکترونیک قدرت و مدولاسیون پهنای پالس، علاوه بر مؤلفه‌های اصلی فرکانس، مؤلفه‌های هارمونیک 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 تزریق‌کننده هارمونیک یا تأثیرپذیرنده از هارمونیک‌های دو اتصال دیگر باشند. نظر به نقش و اهمیت فرکانس در مشخصه اصلی DFIG و منابع متعدد هارمونیک 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].

می‌توان 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 سیم‌پیچی و ساختار استاتور و خرابی‌های سیم‌پیچ استاتور نیز منابع اصلی تولید هارمونیک در سیم‌پیچ 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 میدل‌های 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 هارمونیک DFIG از دیدگاه‌های مختلفی نیز مورد توجه قرار گرفته است. از دیدگاه کیفیت توان و اتصال به شبکه باید الزامات و استانداردهایی همانند IEEE-Std 519 و IEC-Std 61400-21 را داشته باشند [۲۱]. تحلیل هارمونیک از دیدگاه قابلیت اطمینان [۲۲] و تأثیر بر عملکرد سیستم کنترل DFIG [۱۰] و [۲۳] نیز مهم است و همچنین تحلیل هارمونیک در کاهش خرابی‌ها، تشخیص خطاها و برنامه‌ریزی سیستم‌های نگهداری نیز از ابزارهای مؤثر است [۱۲]، [۲۰]، [۲۲] و [۲۴].

اولین تحلیل هارمونیک انجام‌شده DFIG در [۷] است که با فرض ثابت بودن سرعت مکانیکی، اثرات هارمونیک جریان روتور و استاتور را بررسی نموده است. سپس در [۸] بر اساس تئوری میدان چرخان اثرات نامتعادلی در روتور ماشین القایی روتور سیم‌پیچی شده بررسی شده است. در [۱۳] مؤلفه‌های هارمونیک 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 هارمونیک و

چکیده: در شرایط عملکرد عادی یا خطای ژنراتورهای القایی با تغذیه دوگانه، مؤلفه‌های فرکانسی مختلفی در هر یک از سیم‌پیچ‌های 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 کامل‌تری از روابط ارائه‌شده 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 مدل‌سازی نماید. در انتها صحت و دقت روابط و مدل ارائه‌شده با مطالعات موردی صحت‌سنجی شده است.

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

۱- مقدمه

ماشین القایی تغذیه دوپل (DFIG) از نوع ماشین القایی روتور سیم‌پیچی 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 هم‌اکنون در بیش از ۵۰٪ بازار سیستم تبدیل انرژی باد استفاده می‌شوند [۳].

مزیت اصلی این ژنراتور این است که با اتصال استاتور به شبکه با فرکانس ثابت می‌تواند در سرعت‌های مختلف مکانیکی توان الکتریکی با فرکانس ثابت تولید کند. این امکان از طریق کنترل فرکانس در سیم‌پیچ روتور صورت می‌گیرد که به وسیله میدل‌های الکترونیک قدرت انجام می‌شود. توان نامی این میدل‌ها در حد یک سوم توان نامی نسبت به ژنراتور است و این مزیت دیگر استفاده از این ژنراتور است [۴] و [۵].

با اتصال سیم‌پیچ استاتور به شبکه با فرکانس f_s و کنترل فرکانس سیم‌پیچ روتور (f_r) می‌توان لغزش و در نتیجه توان‌های اکتیو و راکتیو عبوری از سیم‌پیچ‌های استاتور و روتور این ژنراتور را که در سرعت مکانیکی بالاتر و یا پایین‌تر از سرعت سنکرون $\omega_m = 2\pi(f_s \pm f_r)$ چرخانده می‌شود کنترل نمود [۶]. از این رو کنترل فرکانس نقش اساسی در کنترل و بهره‌گیری از مزیت‌های این ژنراتور دارد [۲]. کنترل فرکانس روتور در توربین‌های بادی با DFIG از طریق میدل الکترونیک قدرت سمت روتور (RSC) صورت می‌گیرد. این میدل از نوع میدل تمام‌موج سه‌فاز کنترل‌شده DC به AC است [۴] تا [۶] که به دلیل ماهیت

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

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

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

$$\begin{aligned} v_{as}(t) &= V_{MS} \cos(\omega_s t + \theta_{vs}) \\ v_{bs}(t) &= V_{MS} \cos(\omega_s t + \theta_{vs} - \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} v_{cs}(t) &= V_{MS} \cos(\omega_s t + \theta_{vs} + \frac{2\pi}{3}) \\ v_{ar}(t) &= V_{MR} \cos(\omega_r t + \theta_{vr}) \\ v_{br}(t) &= V_{MR} \cos(\omega_r t + \theta_{vr} - \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} v_{cr}(t) &= V_{MR} \cos(\omega_r t + \theta_{vr} + \frac{2\pi}{3}) \\ i_{as}(t) &= I_{MS} \cos(\omega_s t + \theta_{is}) \\ i_{bs}(t) &= I_{MS} \cos(\omega_s t + \theta_{is} - \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} i_{cs}(t) &= I_{MS} \cos(\omega_s t + \theta_{is} + \frac{2\pi}{3}) \\ i_{ar}(t) &= I_{MR} \cos(\omega_r t + \theta_{ir}) \\ i_{br}(t) &= I_{MR} \cos(\omega_r t + \theta_{ir} - \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} i_{cr}(t) &= I_{MR} \cos(\omega_r t + \theta_{ir} + \frac{2\pi}{3}) \\ v_s(t) &= [v_{as}(t) \quad v_{bs}(t) \quad v_{cs}(t)]^T \end{aligned} \quad (5)$$

$$v_r(t) = [v_{ar}(t) \quad v_{br}(t) \quad v_{cr}(t)]^T \quad (6)$$

$$i_s(t) = [i_{as}(t) \quad i_{bs}(t) \quad i_{cs}(t)]^T \quad (7)$$

$$i_r(t) = [i_{ar}(t) \quad i_{br}(t) \quad i_{cr}(t)]^T \quad (8)$$

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

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{L_{mr}}{2} & -\frac{L_{mr}}{2} \\ -\frac{L_{mr}}{2} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{L_{mr}}{2} \\ -\frac{L_{mr}}{2} & -\frac{L_{mr}}{2} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$M_{sr} = \frac{2L_{sr}}{3} \times \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (11)$$

دامنه آنها نیاز است. همچنین تحلیل مؤلفه‌های هارمونیک 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.

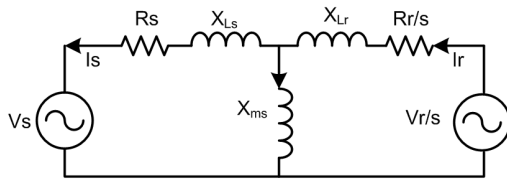
در [۱۰] روابط الکترومغناطیس ماشین در شرایط عدم تعادل ولتاژ شبکه و هارمونیک‌های شبکه ارائه شده است. هر چند در این مقاله از روش مدل المان نامحدود برای مدل‌سازی الکترومغناطیسی ماشین استفاده شده است ولی سرعت ژنراتور ثابت فرض شده [۱۵] که مطابق با شرایط عملی نیست و ارتباط مؤلفه‌های هارمونیک استاتور، روتور با سرعت و گشتاور مکانیکی بیان نشده است. در [۱۱] اثر بار غیر خطی و ایجاد جریان غیر خطی و در نتیجه ولتاژ هارمونیک در استاتور DFIG بررسی شده و سپس روش کنترلی برای بهبود آن ارائه شده است. در [۱۲] روشی بر اساس تشخیص مؤلفه‌های هارمونیک مدوله‌شده توسط روتور برای تشخیص خطای سیم‌پیچ‌ها ارائه شده و فقط به ذکر مؤلفه‌های هارمونیک تولیدشده 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 نشده است، لذا در این مقاله روش تحلیلی با جزئیات روابط برای رفتار هارمونیک DFIG ارائه شده است و برای مؤلفه‌های اصلی هارمونیک و مؤلفه‌های حاصل از مدولاسیون و تقابل فرکانس‌ها در ماشین مدل نسبتاً دقیقی ارائه شده که دامنه و فاز مؤلفه‌های فرکانسی از جمله میان هارمونیک‌ها 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 شده است.

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 سینوسی بودن 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 هارمونیک استاتور و روتور قابل مدل‌سازی و محاسبه است و در انتها مدل ارائه‌شده با مطالعه موردی ارزیابی شده است. در این مقاله از معادلات زمانی DFIG در حالت دائم استفاده شده است و از تبدیل dq و انتقال به فضای متعامد dq استفاده نشده است.

۲- روابط تحلیل DFIG در شرایط عادی

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



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

$$S = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (19)$$

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

$$i_r = i_{vr}^r - i_{vs}^r, \quad i_{vr}^r = \frac{v_r^r}{S} / Z_r^{eq} \quad (20)$$

$$Z_r^{eq} = \frac{r_r'}{S} + jx_r' + \frac{jx_m(r_s + jx_s)}{r_s + jx_s + jx_m}$$

$$i_{vs}^r = \frac{v_s}{Z_s^{eq}} \frac{jx_m}{r_r'/S + jx_r' + jx_m}$$

$$Z_s^{eq} = r_s + jx_s + \frac{jx_m(r_r'/S + jx_r')}{r_r'/S + jx_r' + jx_m}$$

$$i_s = i_{vs}^s - i_{vr}^s, \quad i_{vs}^s = \frac{v_s}{Z_s^{eq}} \quad (21)$$

$$Z_s^{eq} = r_s + jx_s + \frac{jx_m(r_r'/S + jx_r')}{r_r'/S + jx_r' + jx_m}$$

$$i_{vr}^s = \left(\frac{v_r^r}{S} / Z_r^{eq} \right) \left(\frac{jx_m}{r_s + jx_s + jx_m} \right)$$

$$Z_r^{eq} = \frac{r_r'}{S} + jx_r' + \frac{jx_m(r_s + jx_s)}{r_s + jx_s + jx_m}$$

۳- تحلیل هارمونیکی DFIG

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

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

$$v_{ar}'(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_{MRh}' \cos(\omega_r t + \theta_{vrh})$$

$$v_{br}'(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_{MRh}' \cos(\omega_r t + \theta_{vrh} - \frac{2\pi h}{3}) \quad (22)$$

$$v_{cr}'(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_{MRh}' \cos(\omega_r t + \theta_{vrh} + \frac{2\pi h}{3})$$

$$i_{as}(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_{MSh} \cos(\omega_{ish} t + \theta_{isha})$$

$$i_{bs}(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_{MSh} \cos(\omega_{ish} t + \theta_{ishb}) \quad (23)$$

$$i_{cs}(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_{MSh} \cos(\omega_{ish} t + \theta_{ishc})$$

$$M_{rs} = \frac{2L_{rs}}{3} \times \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$r_r' = r_r \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2, \quad L_{ms} = L_{sr} \frac{N_s}{N_r}, \quad L_{mr} = L_{ms} \left(\frac{N_r}{N_s} \right)^2 \quad (13)$$

$$L_{lr}' = L_{lr} \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2, \quad i_r' = i_r \frac{N_r}{N_s}, \quad v_r' = v_r \frac{N_s}{N_r}$$

$$\begin{bmatrix} V_{MS} e^{j(\omega_s t + \theta_{vs})} \\ V_{MR}' e^{j(\omega_r t + \theta_{vr})} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s I_{MS} e^{j(\omega_s t + \theta_{vs})} \\ r_r' I_{MR}' e^{j(\omega_r t + \theta_{vr})} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{2L_{ms}}{3} & L_{ms} e^{j\theta_r} \\ L_{ms} e^{j\theta_r} & L_{lr}' + \frac{2L_{ms}}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{MS} e^{j(\omega_s t + \theta_{vs})} \\ I_{MR}' e^{j(\omega_r t + \theta_{vr})} \end{bmatrix} \quad (14)$$

چنانچه فقط نسبت تبدیل دامنه روتور به استاتور را بر اساس نسبت دوره‌های 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

$$\omega_s = \omega_m + \omega_r \quad (15)$$

$$\omega_m = \frac{p\Omega_m}{2} \quad (16)$$

$$\theta_r = \omega_m t + \theta \quad (16)$$

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

$$\frac{d}{dt} \psi_r^r e^{j\theta_r} = \frac{d}{dt} \psi_r^s - j\psi_r^s \frac{d\theta_r}{dt} \quad (17)$$

در این صورت (۱۴) با لحاظ نمودن (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

$$\begin{bmatrix} V_{MS} e^{j(\omega_s t + \theta_{vs})} \\ \frac{V_{MR}' e^{j(\omega_r t + \theta_{vr} + \theta_r)}}{S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + j(L_{ls} + \frac{2L_{ms}}{3})\omega_s & jL_{ms}\omega_s \\ jL_{ms}\omega_s & \frac{r_r'}{S} + j(L_{lr}' + \frac{2L_{ms}}{3})\omega_s \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{MS} e^{j(\omega_s t + \theta_{vs})} \\ I_{MR}' e^{j(\omega_r t + \theta_{vr} + \theta_r)} \end{bmatrix} \quad (18)$$

جدول ۱: اثر هارمونیک‌های چپ‌گرد و راست‌گرد.

h	۱	۲	۳	۴	۵
h_s	۱	-۲	۰	۴	-۵

$$\omega_{irh} = h\omega_r \quad (26)$$

$$\omega_{ish} = \omega_{irh} + \omega_m \quad (27)$$

این نتیجه به دست می‌آید که در این شرایط در جریان روتور فقط هارمونیک‌های موجود در ولتاژ روتور ایجاد می‌شود و در جریان استاتور هارمونیک‌های $h_s\omega_r + \omega_m$ ایجاد می‌شود. در شبیه‌سازی دقیقاً چنین حالتی نیز به دست آمد. البته مقدار h_s در این رابطه بر اساس راست‌گرد و چپ‌گرد بودن طبق جدول ۱ است

$$S_h = \frac{\omega_{ish} - \omega_m}{\omega_{ish}} = \frac{h_s\omega_r}{h_s\omega_r + \omega_m} \quad (28)$$

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 $i_{sh}(S)/v_{rh}(S)$ و $i_{rh}(S)/v_{rh}(S)$ را به دست آورد.

دامنه و فاز جریان روتور و استاتور در سمت استاتور در فرکانس $h_s\omega_r + \omega_m$ از (۲۹) و (۳۰) به دست می‌آید.

$$i_r = i_{vrh}^r \quad (29)$$

$$i_{vrh}^r = \frac{v_{vrh}^r}{S_h} / Z_r^{eq}$$

$$Z_r^{eq} = \frac{r_r'}{S_h} + jx_r' + \frac{jx_m(r_s + jx_s)}{r_s + jx_s + jx_m}$$

$$i_s = -i_{vrh}^s \quad (30)$$

$$i_{vrh}^s = \left(\frac{v_r'}{S_h} / Z_r^{eq} \right) \frac{jx_m}{r_s + jx_s + jx_m}$$

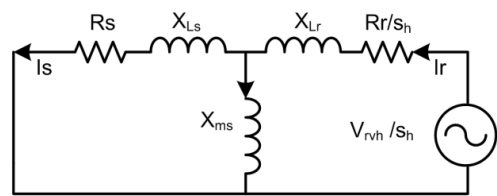
۳-۲ نوسان سرعت و بدون حضور هارمونیک ولتاژ روتور و ولتاژ استاتور

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 می‌شود

$$\omega_m = \omega_m + A_{\omega m} \sin(\omega_{mr}t + \alpha_{mr}) \quad (31)$$

$$\theta_r = \int \omega_m dt = \omega_m t - \frac{A_{\omega m}}{\omega_{mr}} \cos(\omega_{mr}t + \alpha_{mr}) \quad (32)$$

در تبدیل $\alpha\beta$ توابع کسینوس در (۱۱) و (۱۲) به $e^{j\theta}$ تبدیل می‌شوند ولی با توجه به (۳۱) باید بررسی مجددی صورت گیرد. برای این منظور با فرض $\omega_m t \gg (A_{\omega m}/\omega_{mr}) \cos(\omega_{mr}t + \alpha_{mr})$ می‌توان از تخمین (۳۳) و (۳۴) استفاده نمود و (۳۵) را به دست آورد



شکل ۲: مدل DFIG در شرایط هارمونیک در فرکانس‌های $h_s\omega_r + \omega_m$.

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

$$i'_{br}(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I'_{MRh} \cos(\omega_{irh}t + \theta_{irhb}) \quad (24)$$

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

لازم به ذکر است که برای امکان مدل‌نمودن زیرهارمونیک‌ها و هارمونیک‌های میانی در جریان روتور و جریان استاتور، فرکانس زاویه‌ای 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_{irh} در نظر گرفته شده‌اند.

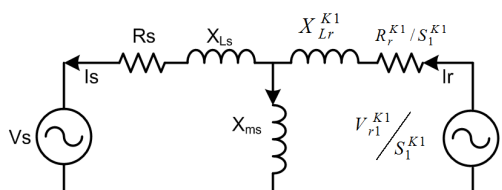
در تبدیل $\alpha\beta$ مؤلفه‌های چپ‌گرد و راست‌گرد رفتار متفاوتی دارند که در بخش ۱ پیوست به آن اشاره شده است. همچنین اگر زوایای مؤلفه‌های مختلف فرکانسی جریان‌های abc با هم مضرب صحیحی از $2\pi/3$ با هم اختلاف نداشته باشند، نمی‌توان از تبدیل $\alpha\beta$ استفاده نمود. یعنی در هر مؤلفه فرکانسی برای جریان روتور باید θ_{irha} ، θ_{irhb} و θ_{irhc} با هم دو به دو اختلاف مضرب صحیحی از $2\pi/3$ داشته باشند و همین طور که همواره زاویه‌های سه فاز مضرب صحیحی از $2\pi/3$ با هم اختلاف دارند و لذا می‌توان از تبدیل $\alpha\beta$ استفاده نمود.

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

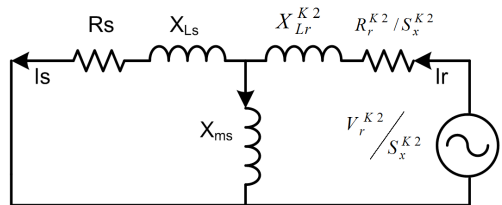
$$\left[\begin{array}{c} V_{MS} e^{j(\omega_r t + \theta_{rs})} \\ \sum_{h=1}^{\infty} V'_{MRh} e^{j(h\omega_r t + \theta_{rh})} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} r_s \sum_{h=1}^{\infty} I_{MSh} e^{j(\omega_{sh} t + \theta_{sh})} \\ r_r' \sum_{h=1}^{\infty} I'_{MRh} e^{j(\omega_{rh} t + \theta_{rh})} \end{array} \right] + \quad (25)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\begin{array}{cc} L_{ls} + \frac{3L_{ms}}{2} & L_{ms} e^{j\theta_r} \\ L_{ms} e^{j\theta_r} & L_{lr}' + \frac{3L_{ms}}{2} \end{array} \right) \left[\begin{array}{c} \sum_{h=1}^{\infty} I_{MSh} e^{j(\omega_{sh} t + \theta_{sh})} \\ \sum_{h=1}^{\infty} I'_{MRh} e^{j(\omega_{rh} t + \theta_{rh})} \end{array} \right]$$

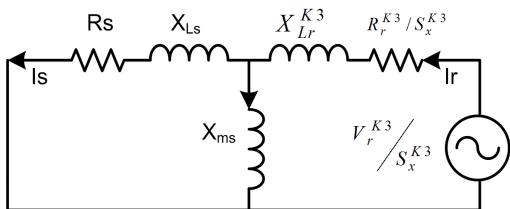
لذا می‌توان نتیجه گرفت که بر اساس (۲۵) و استفاده از تبدیل (۱۷) هارمونیک‌های ولتاژ روتور باعث ایجاد هارمونیک‌هایی مشابه در جریان روتور خواهند شد و این به مفهوم برقراری (۲۶) است و بر اساس (پ-۲) و (پ-۳) در پیوست، رابطه بین هارمونیک‌های جریان استاتور به صورت (۲۷) خواهد بود که ω_m همان سرعت زاویه‌ای مکانیکی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



(الف)



(ب)

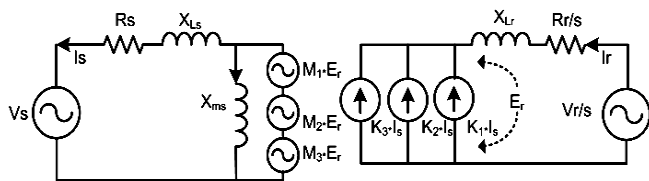


(ج)

شکل ۴: مدار معادل برای ژنراتور با یک مؤلفه هارمونیک در ولتاژ روتور و امکان نوسان سرعت مکانیک، (الف) مدار معادل منتقل شده در سمت استاتور با نسبت تبدیل N_s/N_r در سرعت مکانیکی ω_m ، (ب) مدار معادل منتقل شده در سمت استاتور با نسبت تبدیل $|K2|N_s/N_r$ در سرعت مکانیکی $\omega_m + \omega_{mr}$ و (ج) مدار معادل منتقل شده در سمت استاتور با نسبت تبدیل $|K3|N_s/N_r$ در سرعت مکانیکی $\omega_m - \omega_{mr}$.

طبق (۳۷) تا (۳۹) ضرایب $K1$ تا $K3$ و $M1$ تا $M3$ 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 $K1$ تا $K3$ و $M1$ تا $M3$ رابطه انتقال مؤلفه‌های 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 $K1$ تا $K3$ و $M1$ تا $M3$ انجام می‌شود. لذا می‌توان مدار شکل ۳ را بر اساس اصل جمع آثار و استقلال هارمونیک 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 $K1$ و $M1$ با هم کوپل شده‌اند. در شکل‌های ۴-ب و ۴-ج فرکانس‌های ایجاد شده در استاتور به علت نوسان سرعت مکانیکی نشان داده شده که در این شکل‌ها Δx لغزش محاسبه شده بر حسب مؤلفه‌های فرکانسی $\omega_m + \omega_{mr}$ و $\omega_m - \omega_{mr}$ هستند. در این مدار معادل‌ها پارامترهای روتور به سمت استاتور علاوه بر لحاظ نمودن (۱۳) مقادیر فرکانسی و دامنه‌ای (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 $\omega_m + \omega_{mr}$ و $\omega_m - \omega_{mr}$ در این مدل به دست آمده است. مؤلفه‌های بزرگ‌تر برای h_m در رابطه $\omega_r \pm h_m \omega_{mr}$ و $\omega_s \pm h_m \omega_{mr}$ بر اساس تقریب‌های دقیق‌تر (۳۳) و (۳۴) به دست می‌آیند که دامنه‌های خیلی کوچکی دارند. رابطه دقیق دامنه و فاز مؤلفه‌های جریانی استاتور و روتور را می‌توان مشابه (۲۱) و (۲۲) 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 بیان شده ظاهر می‌شوند.



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

$$\cos\left(\frac{A_{om}}{\omega_{mr}} \cos(\omega_{mr}t + \alpha_{mr})\right) = 1 \quad (33)$$

$$\sin\left(\frac{A_{om}}{\omega_{mr}} \cos(\omega_{mr}t + \alpha_{mr})\right) \approx \frac{A_{om}}{\omega_{mr}} \cos(\omega_{mr}t + \alpha_{mr}) \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \cos \theta_r &= \cos(\omega_m t + \theta - \frac{A_{om}}{\omega_{mr}} \cos(\omega_{mr}t + \alpha_{mr})) = \\ &= \cos(\omega_m t + \theta) + \frac{A_{om}}{2\omega_{mr}} \cos(\omega_m t + \theta + \omega_{mr}t + \alpha_{mr} - \frac{\pi}{2}) \\ &+ \frac{A_{om}}{2\omega_{mr}} \cos(\omega_m t + \theta - \omega_{mr}t - \alpha_{mr} - \frac{\pi}{2}) \end{aligned} \quad (35)$$

در نتیجه عبارت در (۲۵) به (۳۶) تبدیل می‌شود

$$\begin{aligned} e^{j\theta_r} &= e^{j(\omega_m t + \theta)} + \frac{A_{om}}{2\omega_{mr}} e^{j(\omega_m t + \theta + \omega_{mr}t + \alpha_{mr} - \frac{\pi}{2})} + \\ &+ \frac{A_{om}}{2\omega_{mr}} e^{j(\omega_m t + \theta - \omega_{mr}t - \alpha_{mr} - \frac{\pi}{2})} \end{aligned} \quad (36)$$

مشاهده می‌شود اگر سرعت مکانیکی نوسان ω_{mr} داشته باشد در تبدیل و انتقال مؤلفه‌های هارمونیک از روتور به استاتور و بالعکس علاوه بر فرکانس ω_m مؤلفه‌های $\omega_m + \omega_{mr}$ و $\omega_m - \omega_{mr}$ نیز تأثیر دارند. شبیه‌سازی نشان می‌دهد در این حالت در جریان روتور مؤلفه‌های هارمونیک $\omega_r \pm h_m \omega_{mr}$ و جریان استاتور مؤلفه‌های هارمونیک $\omega_s \pm h_m \omega_{mr}$ مشاهده می‌شود. در نتیجه می‌توان گفت در صورتی که بخش مکانیکی نوسانی شود کلیه مؤلفه‌های جریان استاتور و جریان روتور به اندازه مضارب صحیحی از فرکانس نوسان مکانیکی جابه‌جا می‌شوند. مطابق (۳۶) مدار معادل ژنراتور به صورت شکل ۳ خواهد بود.

در مدار مثال فوق ضرایب $K1$ تا $K3$ و $M1$ تا $M3$ بر اساس بخش‌های (۳۶) هستند که همان رابطه ترانسفورماتوری میدان مغناطیسی چرخان روتور است که هم بر دامنه و هم بر فرکانس تأثیر می‌گذارد

$$K1 = I_s e^{j\omega_m t + \theta} \quad (37)$$

$$M1 = \frac{E_r}{e^{j\omega_m t + \theta}}$$

$$K2 = \frac{A_{om}}{2\omega_{mr}} e^{j(\omega_m t + \theta + \omega_{mr}t + \alpha_{mr} - \frac{\pi}{2})} \quad (38)$$

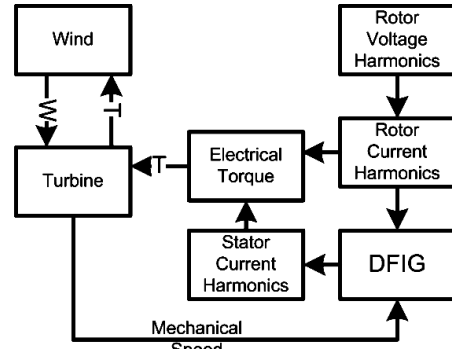
$$M2 = \frac{1}{\frac{A_{om}}{2\omega_{mr}} e^{j(\omega_m t + \theta + \omega_{mr}t + \alpha_{mr} - \frac{\pi}{2})}}$$

$$K3 = \frac{A_{om}}{2\omega_{mr}} e^{j(\omega_m t + \theta - \omega_{mr}t - \alpha_{mr} - \frac{\pi}{2})} \quad (39)$$

$$M3 = \frac{1}{\frac{A_{om}}{2\omega_{mr}} e^{j(\omega_m t + \theta - \omega_{mr}t - \alpha_{mr} - \frac{\pi}{2})}}$$

۳-۴ وجود مؤلفه‌های هارمونیک 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 هارمونیک برابر خواهد داشت. $\omega_{rh} = \omega_{sh} - \omega_m = h\omega_s - \omega_m$ وجود خواهند داشت.



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

۴- 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

۴-۱ تبدیل جریان‌های استاتور و روتور به گشتاور الکتریکی

چنانچه فرض شود گشتاور مطابق (۴۶) از مؤلفه‌های مختلف هارمونیک (نوسانی) تشکیل شده باشد، هر مؤلفه T_{hr} بر اساس روابط ماشین به صورت (۴۷) محاسبه می‌شود که باید شرط (۴۸) برقرار باشد

$$T_e = \sum_{h_r=1}^{\infty} T_{hr} \sin(\omega_{hr} t + \phi_{hr}) \quad (46)$$

$$T_e = -\frac{1}{2} p L_{ms} \times \sum_{i,j} I_{si} I_{rj} \sin(\omega_{si} t - \omega_m t - \omega_{rj} t + \theta_{si} - \theta_m - \theta_{rj}) \quad (47)$$

$$\omega_{hr} = \omega_{si} + \omega_{rj} \quad (48)$$

برای لحاظ نمودن اثر تغییرات سرعت مکانیکی از (۴۹) استفاده می‌شود. در حالت دایم تک‌سینوسی بر اساس (۲)، (۴) و (۴۹) گشتاور به صورت (۵۰) به دست می‌آید که مستقل از سرعت و ثابت است

$$T_e = \frac{1}{2} \frac{p}{2} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abrs} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \frac{\partial M_{sr}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial M_{rs}}{\partial \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abrs} \end{bmatrix} \quad (49)$$

$$T_e = \frac{p L_{ms}}{\lambda} I_{MS} I_{MR} \sin(\theta_{is} - \theta_{ir}) \quad (50)$$

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

$$T_e = -\frac{p L_{ms}}{\lambda} \sum_{h,j} I_{MSh} I_{MRj} \sin(\omega_{sh} t + \theta_{sh} - (\omega_{rj} t + \theta_{rj}) - \theta_m(t)) \quad (51)$$

$$T_{Lh} \sin(\phi_{TLh}) = \frac{2}{p} A_{om} [J \omega_{mr} \cos(\alpha_{mr}) + D \sin(\alpha_{mr})] + T_{eh} \sin(\phi_{Teh}) \quad (52)$$

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 می‌شود، بدون هارمونیک است و ولتاژ روتور که از طریق مبدل سمت روتور (RSC) تأمین می‌شود، هارمونیک دارد و این هارمونیک‌ها مضارب صحیحی از فرکانس روتور هستند، در این حالت سرعت نیز نوسان پیدا می‌نماید. 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 می‌توان 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 می‌شوند و (۱۴) به صورت (۲۵) نوشته می‌شود و به طور مشابه حالت قبل باید همواره (۴۰) برقرار باشد

$$\omega_{ish} t = \omega_{rsh} t + \theta_r \quad (40)$$

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

$$\omega_{sh} = \omega_s \pm K \Delta\omega_{rh} \quad (41)$$

$$\omega_{mh} = \omega_m \pm M \Delta\omega_{rh} \quad (42)$$

در صورتی که فقط مؤلفه تحریک ω_r وجود داشته باشد $K = M$ بوده و در صورتی که فقط مؤلفه تحریک ω_{rh} وجود داشته باشد $K = M + 1$ است. مطابق حالت‌های اول در جریان روتور فقط مؤلفه‌های هارمونیک مطابق با مؤلفه‌های هارمونیک ولتاژ روتور ایجاد می‌شود و به این دلیل مطابق حالت دوم، در جریان روتور مؤلفه‌های هارمونیک ناشی از نوسانات مکانیکی ایجاد نمی‌شوند که نوسانات مکانیکی در این حالت ناشی از هارمونیک‌های روتور است.

در صورتی که ولتاژ روتور مؤلفه‌های هارمونیک بیشتری به شرح $\omega_r, \omega_{r1}, \omega_{r2}, \omega_{r3}, \dots$ داشته باشد، فرکانس‌های هارمونیک جریان استاتور و سرعت مکانیکی به صورت (۴۴) و (۴۵) خواهند بود. در صورتی که منبع تحریک در مدار معادل شکل ۳ ω_r باشد $K = M$ بوده و در صورتی که منبع تحریک ω_{ri} باشد $K = M + 1$ است

$$\Delta\omega_{rhi} = \omega_{ri} - \omega_r, \quad i = 1, 2, \dots \quad (43)$$

$$\omega_{sh} = \omega_s \pm K \Delta\omega_{rhi}, \quad i = 1, 2, \dots \quad (44)$$

$$\omega_{sm} = \omega_m \pm M \Delta\omega_{rhi}, \quad i = 1, 2, \dots \quad (45)$$

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 (ω_{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 نیز یک رابطه وجود دارد که به دامنه نوسانات سرعت مکانیکی (A_{om}) وابسته است. از حل این معادلات، آخرین پارامتر در شرایط هارمونیک و نوسان سرعت به دست می‌آید که دامنه نوسانات سرعت مکانیکی است.

۵- مدل نهایی بر اساس روابط تحلیلی

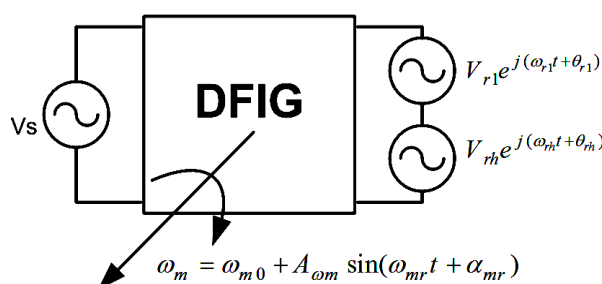
جمع بندی کلی این است که در شرایط ژنراتوری و با حضور ولتاژ هارمونیک در منبع متصل به روتور، نشر هارمونیک‌ها به این صورت است که ولتاژ روتور در سیم‌پیچ روتور همان مؤلفه‌های هارمونیک موجود در ولتاژ روتور را ایجاد می‌کند. این مؤلفه‌های هارمونیک باعث ایجاد مؤلفه‌های هارمونیک در جریان استاتور و سرعت مکانیکی می‌شوند. سپس مؤلفه‌های جریانی استاتور و روتور ایجاد مؤلفه‌های گشتاور الکتریکی نموده و باعث می‌شوند بر اساس رفتار توربین و پره‌ها نوسانات مکانیکی ایجاد شوند. این روند در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق شکل 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 هارمونیک به میزان مشخصی در روتور، میزان انتشار و سهم استاتور و سرعت محاسبه شود، باید روابطی بر حسب نقطه کار، امیدانس‌ها 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_{r1} با فرکانس ω_{r1} و فقط یک مؤلفه هارمونیک با دامنه V_{rh} با فرکانس ω_{rh} است و سرعت مکانیکی نوسانی به صورت (۳۱) داشته باشد در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: ژنراتور تغذیه دوگانه با یک مؤلفه هارمونیک در ولتاژ روتور و امکان نوسان سرعت مکانیکی.

۴-۲ رابطه گشتاور الکتریکی و مکانیکی با سرعت در بخش‌های مکانیکی

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

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{p}{2} (T_L - T_e) - D\omega_m \quad (53)$$

بر اساس (۵۳) در حالت دایم و در صورت ثابت‌بودن سرعت، ممان اینرسی در میزان گشتاور تأثیر ندارد و بر اساس (۵۱) می‌توان نتیجه گرفت که دامنه‌های جریان در مؤلفه‌های مختلف فرکانسی به ممان اینرسی ربطی ندارند. چنانچه گشتاور مکانیکی را همراه مؤلفه‌های هارمونیک آن به صورت (۵۴) و گشتاور الکتریکی را به صورت (۵۵) در نظر بگیریم

$$T_L = T_{Lc} + T_{Lh} \sin(\omega_{TLh} t + \phi_{TLh}) \quad (54)$$

$$T_e = T_{ec} + T_{eh} \sin(\omega_{Teh} t + \phi_{Teh}) \quad (55)$$

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 هارمونیک به دست می‌آید

$$T_{Lc} = \frac{2D}{p} \omega_{m0} + T_{ec} \quad (56)$$

$$\omega_{mr} = \omega_{TLh} = \omega_{Teh} \quad (57)$$

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

۴-۳ رابطه گشتاور مکانیکی و سرعت در پره‌ها و مدل باد

بخش تکمیل‌کننده رابطه بین گشتاور باد (T_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 هارمونیک وجود نداشته باشد و در حول نقطه کار خطی بگیریم می‌توان قبول کرد که مؤلفه‌های هارمونیک سرعت و گشتاور باد یکی است و لذا می‌توان از (۵۲) نتیجه گرفت که مؤلفه‌های هارمونیک گشتاور الکتریکی نیز باید همان مؤلفه‌های سرعت و گشتاور مکانیکی باشد.

با قبول یکسان‌بودن مؤلفه فرکانسی، دامنه نوسانات سرعت و گشتاور، دامنه T_{Lh} و A_{om} از طریق مدل باد به هم مرتبط می‌شوند.

چنانچه سرعت‌ها در معادلات به صورت پریونیت در نظر گرفته شوند، اثر تبدیل سرعت‌ها در جعبه دنده حذف می‌شود و چنانچه ممان اینرسی

جدول ۲: مشخصات توربین و ژنراتور برای شبیه‌سازی.

R_s	$۱,۹۶۵۴e-۲$	pu in stator side
R_r	$۱,۹۰۹e-۲$	pu in stator side
L_{ls}	$۳,۹۷e-۲$	Pu in stator side
L_{lr}	$۳,۳۹e-۵$	pu in stator side
L_m	$۱,۳۴۵$	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)
P	۲	pole pairs

۶- ارزیابی نتایج با شبیه‌سازی - مطالعه موردی

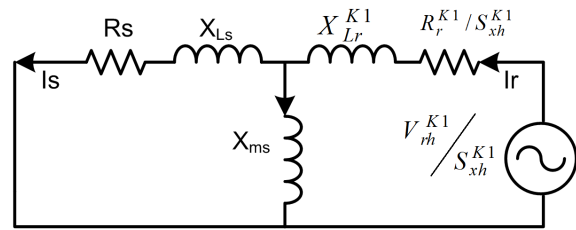
در این بخش نتایج تحلیلی ارائه‌شده با مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار Simulink/Matlab مقایسه شده است و صحت و دقت مدل و روابط ارائه‌شده، آزموده شده است. برای شبیه‌سازی از مدل ژنراتور و توربین با مقادیر جدول ۲ استفاده شده است. در ادامه صحت تحلیل‌های ارائه‌شده در بخش‌های قبل به ترتیب از طریق شبیه‌سازی ارزیابی گردیده است.

۶-۱ با حضور هارمونیک ولتاژ روتور و در سرعت ثابت مکانیکی

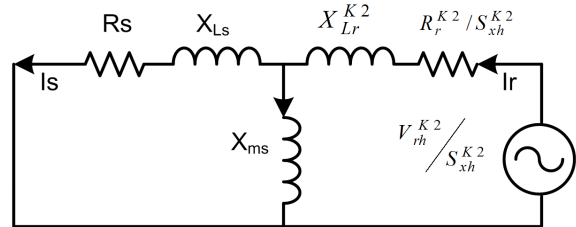
در ابتدا شبیه‌سازی با یک مؤلفه هارمونیک در ولتاژ روتور انجام شده است که به شرح جدول ۳ نتایج مطابق با تئوری ارائه‌شده طبق (۲۶) و (۲۷) به دست آمد. نکته جالب به دست آمده تأثیر هارمونیک‌های چپ‌گرد و راست‌گرد است که در جدول و نتایج شبیه‌سازی دقیقاً مشاهده می‌شود. دامنه‌های هارمونیک ولتاژ روتور به اندازه $v'_{rh} = v_{rh}/h$ 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، یک‌پنجم مؤلفه اصلی است. فرض بعدی موضوع چپ‌گرد و راست‌گرد بودن هارمونیک‌ها و تأثیر آن بر لغزش است که مطابق جداول ۳ و ۴ این کار صورت گرفته و لغزش در فرکانس اصلی برابر $۰,۰۴$ 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 هارمونیک 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 هارمونیک سوم ولتاژ (در صورت وجود در ولتاژ روتور) باعث برقراری مؤلفه‌های سوم جریان نمی‌شوند و می‌توان آنها را صفر در نظر گرفت.

۶-۲ نوسان سرعت و بدون حضور هارمونیک ولتاژ روتور و ولتاژ استاتور

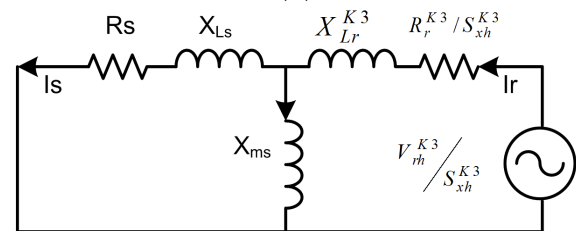
در این حالت سرعت مکانیکی نوسان داشته و منابع ولتاژ استاتور و روتور به صورت سینوسی در نظر گرفته شده‌اند. مؤلفه‌های جدول ۵ بر اساس روابط تحلیلی ارائه‌شده در بخش قبل به دست آمده‌اند. مشاهده می‌شود دامنه و مؤلفه‌های محاسباتی جدول ۵ با نتایج شبیه‌سازی شکل‌های ۸ و ۹ دقت کامل را دارند.



(الف)



(ب)



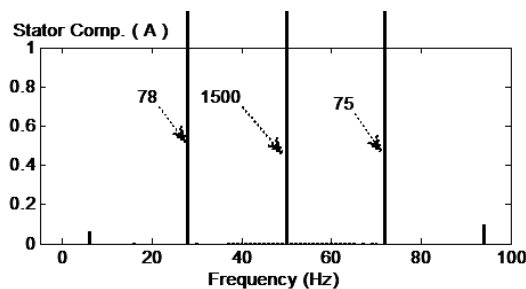
(ج)

شکل ۷: سه مدار مستقل از شش مدار معادل برای شکل ۶ برای مؤلفه‌های هارمونیک ولتاژ روتور، (الف) منتقل‌شده در سمت استاتور با نسبت تبدیل N_s/N_r در سرعت مکانیکی ω_m ، (ب) منتقل‌شده در سمت استاتور با نسبت تبدیل $|K\psi|N_s/N_r$ در سرعت مکانیکی $\omega_m + \omega_{mr}$ و (ج) منتقل‌شده در سمت استاتور با نسبت تبدیل $|K\psi|N_s/N_r$ در سرعت مکانیکی $\omega_m - \omega_{mr}$.

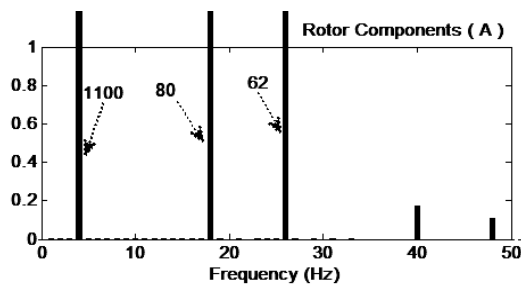
باید یادآوری کرد که مدار معادل حالت فوق با صرف نظر از مؤلفه‌های بالاتر سرعت مکانیکی طبق (۳۳) و (۳۴) به صورت شکل ۷ به دست می‌آید. همچنین در مدار معادل شکل ۶، مؤلفه‌های فرکانسی متعددی به صورت رفت و برگشت در استاتور ایجاد می‌شود که اگر از این مؤلفه‌ها نیز صرف نظر گردد، مدار معادل شکل ۶ به صورت شش مدار مستقل بر اساس اصل جمع آثار و استقلال هارمونیک به دست می‌آیند که سه مدار مربوط به فرکانس اصلی ω_r در روتور مطابق شکل ۴ خواهند بود و سه مدار دیگر به صورت شکل ۷ مربوط به فرکانس ω_{rh} در روتور خواهند بود.

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 زاویه‌ای 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 A_{om} در (۳۱) ظاهر می‌شود. یعنی برای سرعت مکانیکی مشخص، دامنه نوسان سرعت به مشخصه باد و میزان گشتاور تولیدی بستگی دارد.



شکل ۹: دامنه مؤلفه‌های فرکانسی جریان استاتور در شبیه‌سازی.



شکل ۸: دامنه مؤلفه‌های فرکانسی جریان روتور در شبیه‌سازی.

جدول ۳: مؤلفه‌های هارمونیک استاتور ناشی از مؤلفه‌های روتور در سرعت ثابت مکانیکی در $f_s = 50$ ، $f_r = 4$ ، $f_m = 46$.

هارمونیک پنجم چپ‌گرد		هارمونیک هفتم راست‌گرد		مقایسه
شبیه‌سازی	روابط تحلیلی	شبیه‌سازی	روابط تحلیلی	
-۲۰	$-5 \times 4 = -20$	۲۸	$7 \times 4 = 28$	تزریقی در روتور
۲۶	$-5 \times 4 + 46 = 26$	۷۴	$7 \times 4 + 46 = 74$	ایجادشده در استاتور
	-۰٫۷۶		۰٫۳۷۸	لغزش

جدول ۵: مؤلفه‌های فرکانسی بر اساس روابط تحلیلی در حالت نوسان سرعت مکانیکی در $f_s = 50$ ، $f_r = 4$ ، $f_m = 46$.

فرکانس هارمونیک	
$f_{mr} = 22$	اعمالی به مکانیکی
...، -۴۰، -۱۸، ۴، ۲۶، ۴۸، ...	ایجادشده در روتور
...، ۶، ۲۸، ۷۲، ۹۴، ...	ایجادشده در استاتور

جدول ۶: مؤلفه‌های فرکانسی سرعت، گشتاور، جریان استاتور و روتور و دامنه‌های آنها بر اساس روابط تحلیلی.

مؤلفه‌های فرکانسی	
...، ۴ Hz، ۲۰ Hz، ۲۸ Hz، ...	جریان روتور
...، ۲۶ Hz، ۵۰ Hz، ۶۴ Hz، ...	جریان استاتور
۲۴ Hz (Main Speed)	سرعت مکانیکی
۲۴ Hz، ۴۸ Hz (Main Torque)	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 گام‌به‌گام مدل تهیه‌شده، منشأ کلیه مؤلفه‌های هارمونیک 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 شبیه‌سازی نشان‌دهنده کارایی بسیار خوب مدل ارائه‌شده 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.

پیوست

پ-۱ رفتار مؤلفه‌های هارمونیک در تبدیل $\beta\alpha$

رابطه (۲۲) در تبدیل $\alpha\beta$ به (پ-۱) تبدیل می‌شود. مشاهده می‌شود که تبدیل $\alpha\beta$ برای مؤلفه‌های چپ‌گرد و راست‌گرد رفتار متفاوتی دارد

جدول ۴: مؤلفه‌های هارمونیک استاتور ناشی از مؤلفه‌های روتور در سرعت ثابت مکانیکی در $f_s = 50$ ، $f_r = 4$ ، $f_m = 46$.

فرکانس				
هارمونیک	اصلی	دوم	چهارم	پنجم
روتور	۴	-۸	۳۲	-۲۰
مکانیکی	۴۶	۴۶	۴۶	۴۶
استاتور	۵۰	۳۸	۷۸	۲۶
لغزش	+۰٫۰۸	-۰٫۲۱	+۰٫۴۱	-۰٫۷۷

۳-۶ با حضور هارمونیک ولتاژ روتور و امکان نوسان سرعت

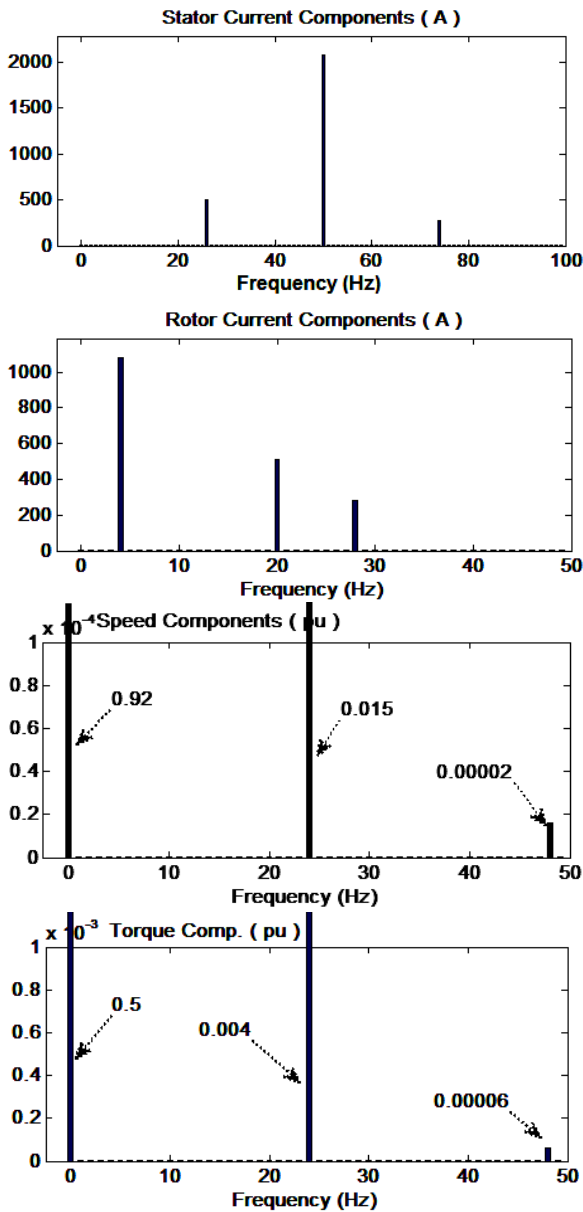
در این حالت یک توربین کامل همراه با مدل باد و پرها شبیه‌سازی شده است. این شبیه‌سازی مطابق داده‌های جدول ۲ است. در لغزش ۰٫۹۲ است و تزریق ولتاژ روتور به صورت یک منبع سینوسی شامل مؤلفه اصلی ۴ Hz و مؤلفه پنجم ۲۰ Hz - با دامنه ۴٪ مؤلفه اصلی ولتاژ روتور شبیه‌سازی شد که نوسانات سرعت، نوسانات گشتاور، هارمونیک‌های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

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



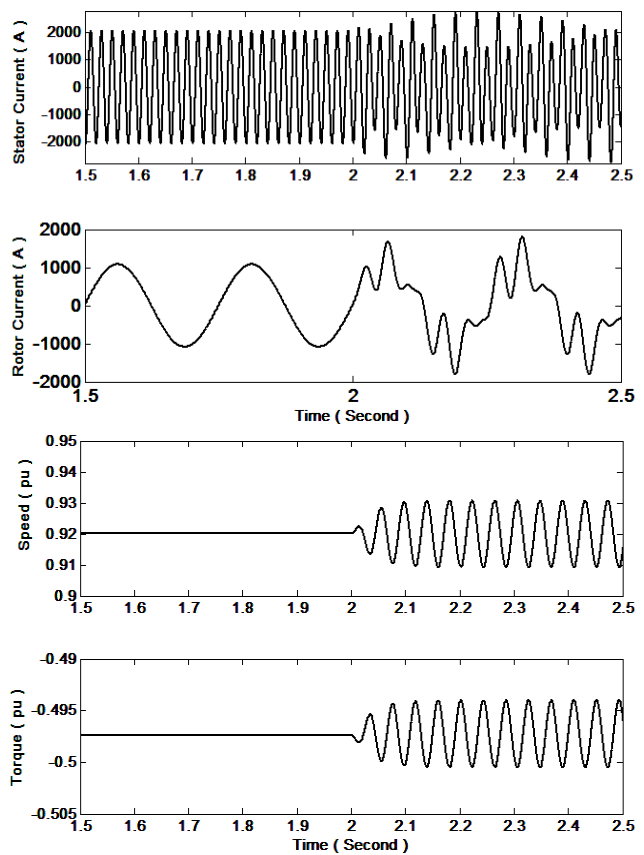
شکل ۱۱: مؤلفه‌های فرکانسی سرعت، گشتاور، جریان استاتور و جریان روتور.

پ-۳ جمع آثار هارمونیک

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

$$\begin{bmatrix} V'_{MRh} e^{j(h\omega_r t + \theta_{vrh})} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s I_{MSh} e^{j(\omega_{sh} t + \theta_{sh})} \\ r'_r I'_{MRh} e^{j(\omega_{rh} t + \theta_{rrh})} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{3}{2} L_{ms} & L_{ms} e^{j\theta_r} \\ L_{ms} e^{j\theta_r} & L'_{lr} + \frac{3}{2} L_{ms} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{MSh} e^{j(\omega_{sh} t + \theta_{sh})} \\ I'_{MRh} e^{j(\omega_{rh} t + \theta_{rrh})} \end{bmatrix} \quad (پ-۲)$$

مشابه تبدیل (۱۴) به (۱۸) رابطه فوق به (پ-۳) تبدیل می‌گردد



شکل ۱۰: نوسانات سرعت، نوسانات گشتاور، هارمونیک‌های جریان استاتور و روتور.

$$v'_{ar}(t) + v'_{br}(t) e^{\frac{j\gamma\pi}{\tau}} + v'_{cr}(t) e^{\frac{j\delta\pi}{\tau}} = \sum_{\substack{h=\epsilon k+1 \\ \epsilon k+\epsilon}}^{\infty} V'_{MRh} e^{j(h\omega_r t + \theta_{vrh})} + \sum_{\substack{h=\epsilon k+2 \\ \epsilon k+\delta}}^{\infty} V'_{MRh} e^{-j(h\omega_r t + \theta_{vrh})} \quad (پ-۱)$$

مشاهده می‌شود که در تبدیل $\alpha\beta$ مؤلفه‌های هارمونیک ضریب سوم به صفر می‌شوند، مؤلفه‌های $6k+1$ و $6k+4$ به صورت راست‌گرد و مؤلفه‌های $6k+2$ و $6k+5$ به صورت چپ‌گرد به دست می‌آیند.

پ-۲ حفظ اختلاف فاز $2\pi/3$ مؤلفه‌های مختلف فرکانسی

جهت امکان استفاده از تبدیل $\alpha\beta$ باید مؤلفه‌های فرکانس یکسان سه‌فاز، اختلاف فازی به صورت مضرب صحیحی از $2\pi/3$ داشته باشند. این موضوع در عمل چنین اتفاق می‌افتد زیرا اگر فرض شود منشأ فاز مؤلفه‌های اصلی و مؤلفه‌های هارمونیک 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 هارمونیک‌ها 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 هارمونیک مطابق (۲۲) دارای چنین شرطی هستند و چنانچه منبع هارمونیک‌ها و نوسانات از طرف سرعت مکانیکی باشد، با توجه به چیدمان سیم‌پیچ‌های استاتور و روتور در ماشین به صورت اختلاف فیزیکی $2\pi/3$ مشاهده می‌شود که ولتاژها و جریان‌های ناشی از نوسانات مکانیکی نیز باز اختلاف فاز مضرب صحیح از $2\pi/3$ با هم خواهند داشت.

- [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. Papaalias, "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-coil-voltage 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 نبوی پور تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی الکترونیک و کارشناسی ارشد قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۲ و ۱۳۷۴ از دانشگاه گیلان و صنعتی اصفهان و دکتری قدرت از دانشگاه تربیت مدرس در سال ۱۳۸۶ به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشیار دانشگاه صنعتی شیراز است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: انرژی‌های نو، ادوات FACT و کیفیت توان.

محمد مهدی منصوری تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی الکترونیک و کارشناسی ارشد قدرت به ترتیب 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 منطقه‌ای یزد است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: الکترونیک قدرت، رله و حفاظت و توربین‌های باد با ژنراتور القایی تغذیه دو گانه.

$$\begin{aligned} \left[\frac{V'_{MRh} e^{j(h\omega_r t + \theta_{rh} + \theta_r)}}{S_h} \right] = & \begin{bmatrix} r_s + j(L_{ls} + \frac{\sqrt{3}L_{ms}}{2})\omega_s & jL_{ms}\omega_s \\ jL_{ms}\omega_s & \frac{r'_r}{S_h} + j(L'_{lr} + \frac{\sqrt{3}L_{ms}}{2})\omega_s \end{bmatrix} \quad (پ-۳) \\ \times \begin{bmatrix} I_{MSH} e^{j(\omega_{sh} t + \theta_{sh})} \\ I'_{MRh} e^{j(\omega_{rh} t + \theta_{rh} + \theta_r)} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

جمع آثار هارمونیکی از سطر اول رابطه (پ-۳)، (۲۶) و از سطر دوم (۲۷) را نتیجه می‌دهد.

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.