



کنترل کننده عصبی برای کنترل سرعت و کاهش نویز صوتی موتور سوئیچ-رلوکتانس در خودروهای هیبریدی

دکتر محمد فرخی

دانشگاه علم و صنعت ایران

farrokhi@iust.ac.ir

مجید حاجتی پور

دانشگاه علم و صنعت ایران

m_hajati@ee.iust.ac.ir

۱- مقدمه

موتور سوئیچ رلوکتانس دارای مزایایی نسبت به دیگر موتورهای الکتریکی می باشد که از آن میان می توان به دارا بودن بازدهی بالا، نسبت گشتاور به جریان زیاد، ساختمان روتور و استاتور ساده، قیمت و هزینه نگهداری پایین و قابلیت اطمینان بالا، اشاره نمود. علاوه بر اینها دمای آهن روتور زیاد افزایش نمی یابد و به آسانی خنک می شود. همچنین، از آنجا که تولید گشتاور در هر فاز نسبت به فازهای دیگر مستقل است در نتیجه قابلیت اطمینان بکارگیری آن بالا می باشد [۲۰]. در نتیجه موتور SR، گزینه مناسبی برای بکارگیری در صنعت به خصوص در مواردی که شرایط محیطی سخت و دمای بالای محیط وجود دارد، می باشد، مانند خودروهای هیبریدی. با توجه به مزایای ذکر شده، موتور SR کاندیدای مناسبی برای بکارگیری در خودروهای هیبریدی و الکتریکی محسوب می شود. اما به دلیل آنکه در حالت عملکرد موتور SR نویز صوتی نسبتاً زیادی تولید می شود و از آنجا که المانهای کنترلی و الکترونیکی بکار رفته در خودروی هیبریدی نسبت به وجود نویز، حساس می باشند در نتیجه کاهش نویز صوتی تولیدی توسط موتور SR در صنعت، امری مهم محسوب می شود.

چکیده: وجود نویز صوتی در موتورهای سوئیچ رلوکتانس (SR)، بکارگیری آن را برای تامین نیروی محرکه در خودروهای هیبریدی دچار مشکل می سازد. در این مقاله سطح ولتاژ باس موتور SR به عنوان متغیر قابل کنترل، توسط بکارگیری کنترل کننده شبکه عصبی از نوع تابع پایه شعاعی (RBF) و چاپر DC، کنترل می شود. از مهمترین مزایای این روش آن است که اولاً تغییرات نیروی شعاعی که مهمترین عامل ایجاد کننده نویز صوتی و نوسانات مکانیکی در موتور SR می باشد، کاهش می یابد، ثانیاً از تعداد کلیدزنیهای مربوط به هر فاز برای کنترل سرعت، به طور چشمگیری کاسته می شود در نتیجه عمر مفید المانهای کلیدزنی افزایش می یابد، ثالثاً بکارگیری کنترل کننده شبکه عصبی باعث می شود که کنترل سرعت نسبت به نویز موجود در سیگنال ورودی بسیار مقاوم شود. در پایان مقاله نتایج حاصل از شبیه سازی روش ارائه شده با یکی از روشهای رایج کنترلی سرعت موتور SR به نام کنترل جریان هیستریزس مقایسه شده و نتایج حاصل شده گویای برتری روش ارائه شده می باشد.

کلمات کلیدی: موتور سوئیچ رلوکتانس، نویز صوتی،

شبکه عصبی، کنترل کننده، خودروی هیبریدی.

۲- نیروی شعاعی و عوامل ایجادکننده نویز صوتی

نیروی شعاعی، نیرویی است که هنگام نزدیک شدن قطب استاتور به قطب روتور و در راستای شعاع روتور به قطب استاتور وارد می‌شود. عوامل موثر در اندازه نیروی شعاعی به صورت زیر بیان می‌شوند [۵].

$$F_r(q, i, l_g) = 0.5i^2 \frac{L(q, i, l_g)}{l_g} \quad (1)$$

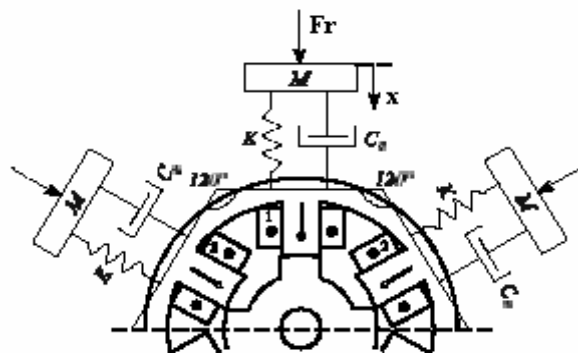
در رابطه (۱) موقعیت روتور، F_r اندازه نیروی شعاعی، l_g کمترین فاصله هوایی بین روتور و استاتور، L اندوکتانس خودی فاز و i جریان فاز می‌باشد. تغییرات نیروی شعاعی همانطور که در قسمت مقدمه ذکر شد از مهمترین عوامل ایجاد نوسان و نویز صوتی در موتور SR محسوب می‌شود [4, 5]. اندازه این تغییرات برابر است با

$$\frac{dF_r}{dt} = \frac{0.5}{l_g} \left(i^2 \frac{dL(q, i, l_g)}{dt} + 2iL(q, i, l_g) \frac{di}{dt} \right) \quad (2)$$

از رابطه (۲) برای بررسی سرعت تغییرات نیروی شعاعی

استفاده می‌شود. عبارت اول رابطه (۲) یعنی $\frac{dL}{dt}$ ، به ساختمان فیزیکی موتور ربط دارد و نمی‌توان با بکارگیری الگوریتم کنترلی آن را کاهش داد. عبارت دوم رابطه (۲) یعنی $\frac{di}{dt}$ را می‌توان توسط کنترل مناسب کاهش داد. در روشهای معمول کنترل موتور SR، به علت اینکه برای کنترل سرعت، مرتبا ولتاژهای ثابتی ($+V_{bus}$ ، $-V_{bus}$ و صفر) بر روی فازهای موتور توسط کلیدهای الکترونیک قدرت سوئیچ می‌شود، در نتیجه $\frac{di}{dt}$ تغییرات زیادی می‌نماید و همین‌طور نوسانات نیروی شعاعی نیز زیاد می‌گردد. در نتیجه تغییرات شدید نیروی شعاعی باعث به نوسان در آمدن قطب و یوغ استاتور شده و نویز صوتی ایجاد می‌گردد. مرجع [۶] برای بررسی آثار نوع ولتاژ اعمالی به فاز موتور در ایجاد نوسانات و نویز صوتی، از مدل جرم، فنر و دمپر بر اساس شکل ۱ برای مدل کردن یوغ استاتور، استفاده کرده است. بر این اساس اگر F_r نیروی شعاعی، M جرم، K_s ثابت فنر، C_d ضریب دمپر و x جابجایی قطب استاتور فرض شود، در نتیجه می‌توان معادله دینامیکی زیر را برای مدل ارائه نمود [۷]:

$$M\ddot{x} + C_d\dot{x} + K_s x = F_r \quad (3)$$



شکل ۱: مدل ارائه شده برای موتور SR توسط مرجع [6]

منابع تولیدکننده نویز در موتورهای الکتریکی به چهار دسته مکانیکی، الکترونیکی، مغناطیسی و ایرودینامیکی تقسیم می‌شوند. در موتور SR بر اساس نتایج تحقیقات، تولید نویز صوتی بطور مستقیم به نوسانات شعاعی یوغ استاتور ارتباط دارد [۳]. اولین تحقیق منتشر شده در مورد نویز تولیدی موتور SR توسط مرجع [۴] انجام شده است. در این تحقیق، ده آزمایش عملی برای نشان دادن اینکه منبع اصلی ایجاد نویز صوتی در موتور SR، نوسانات و لرزش یوغ استاتور می‌باشد، انجام شده است. عامل اصلی در نوسانات یوغ استاتور وجود نیروی شعاعی است که در راستای شعاع روتور به قطب استاتور وارد می‌شود. در قسمت بعدی این مقاله به معرفی این نیرو و بررسی اثر آن در ایجاد نویز صوتی، پرداخته می‌شود. در این مقاله با بکارگیری کنترل‌کننده از نوع شبکه عصبی، سطح ولتاژ باس موتور SR، به عنوان متغیر، کنترل می‌شود. در نتیجه نیاز به کلیدزنیهای زیاد مربوط به هر فاز موتور برای کنترل سطح جریان فاز موتور حذف می‌شود. کنترل‌کننده شبکه عصبی از نوع RBF است و آموزش آن به صورت بلادرنگ و بر اساس خطای تعریف شده که در قسمتهای بعدی مقاله به آن اشاره خواهد شد، می‌باشد. مهمترین مزیت کنترل‌کننده شبکه عصبی مقاوم بودن آن نسبت به وجود نویز در سیگنال ورودی می‌باشد. در ادامه این مقاله در بخش دوم نیروی شعاعی و عوامل موثر در تولید نویز صوتی معرفی می‌شوند و بخش سوم روش کنترلی پیشنهادی را ارائه می‌کند. نتایج شبیه سازی این روش بر روی مدل موتور SR در بخش چهارم ارائه شده و با نتایج مربوط به روش کنترلی حلقه جریان هیستریزس مقایسه می‌شود. نتایج حاصله، گویای برتری این روش می‌باشند.

۳- معرفی روش کنترلی ارائه شده

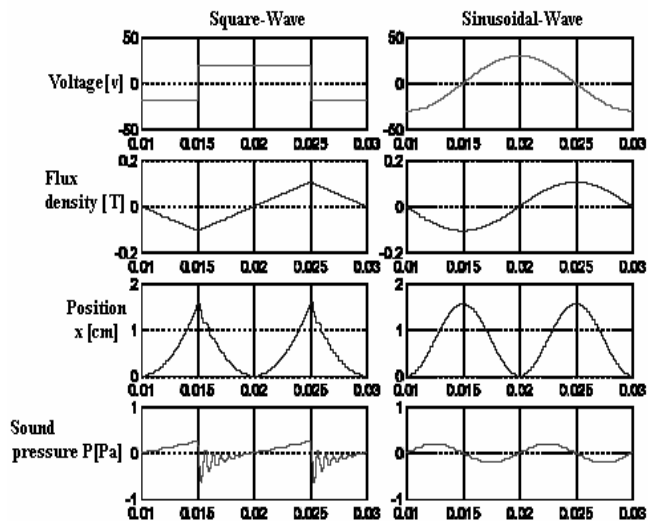
بلوک دیاگرام کنترل کننده در این مقاله، در شکل ۳ نشان داده شده است. در این بلوک دیاگرام خطای بین سرعت موتور و سرعت دلخواه وارد بلوک PI می شود که در این بلوک مجموع ضربیداری از خطا و انتگرال خطا ایجاد می گردد. سپس این سیگنال به عنوان سیگنال آموزشی به کنترل کننده شبکه عصبی اعمال می شود. علت استفاده از بلوک PI بجای استفاده مستقیم از سیگنال خطا برای آموزش کنترل کننده عصبی، بهبود پاسخ دینامیکی سرعت کنترل شده است. یعنی با این کار خطای حالت ماندگار و زمان استقرار سرعت موتور بهبود می یابد. کنترل کننده شبکه عصبی با دریافت خطای تعریف شده، به صورت بلادرنگ وزنه های شبکه را برای اعمال سیگنال کنترلی مناسب (ولتاژ مرجع باس موتور)، تغییر می دهد. خروجی شبکه عصبی که در اصل ولتاژ مرجع باس موتور است وارد کنترل کننده چارپر DC می شود. کنترل کننده چارپر با تنظیم مناسب زوایای آتش ترستور چارپر، ولتاژ مورد نظر را برای اعمال بر روی فازهای موتور SR ایجاد می نماید.

۳-۱- کنترل کننده شبکه عصبی

ساختار اصلی یک شبکه عصبی از نوع پایه شعاعی (RBF) به صورت شکل ۴ می باشد. این نوع شبکه دارای یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و یک لایه پنهان است. در لایه پنهان توابع گرین به تعداد دلخواه وجود دارند که به صورت زیر تعریف می شوند.

$$G(\mathbf{x}; \mathbf{t}) = \exp\left(-\frac{1}{2}\|\mathbf{x} - \mathbf{t}\|^2\right) \quad (5)$$

\mathbf{t} مرکز تابع گرین و \mathbf{x} بردار ورودی می باشد. مراکز توابع گرین در محدوده صفر تا بیشترین سرعت مورد نظر به طور یکنواخت توزیع می شوند. در این مقاله تعداد توابع گرین بکار رفته ۱۴ عدد می باشند. پارامترهای قابل تنظیم در این شبکه، وزنه های ما بین لایه پنهان و لایه خروجی می باشند. همانطور که در قسمت قبل اشاره شد کنترل کننده عصبی بر اساس مجموع ضربیداری از خطای سرعت e و انتگرال آن، آموزش می بیند (خروجی بلوک PI). پس خروجی بلوک PI به صورت زیر است.

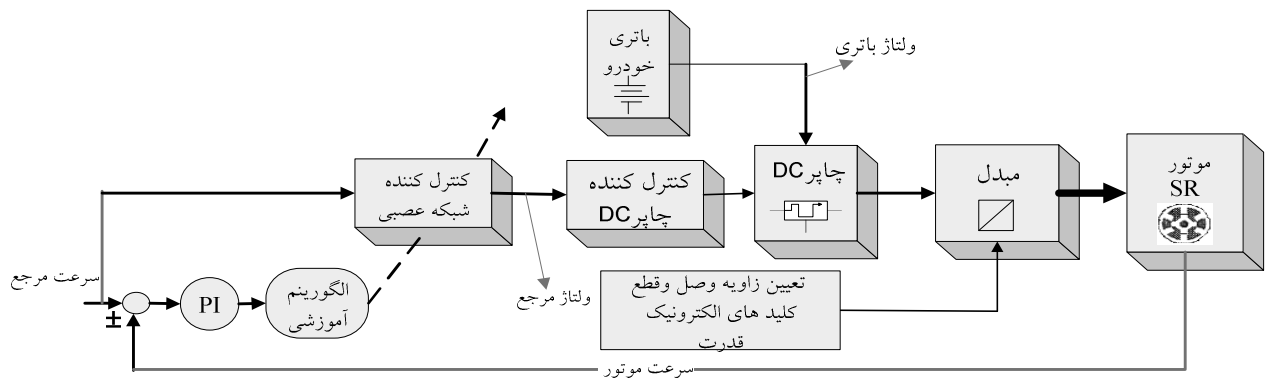


شکل ۲: بررسی اثر نوع ولتاژ اعمالی به فاز استاتور بر روی میزان نویز صوتی تولید شده

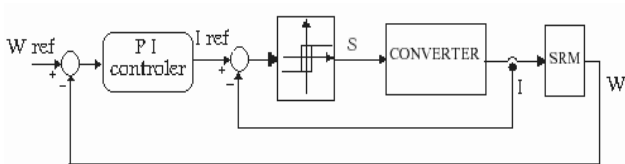
که در آن پارامترهای M ، K_s و C_d بر اساس ساختار موتور تعیین می شوند. فشار سیگنال صوتی P ، ایجاد شده از نوسانات سیستم مدل شده (تغییرات x)، از رابطه زیر حاصل می شود

$$P = r c \quad (4)$$

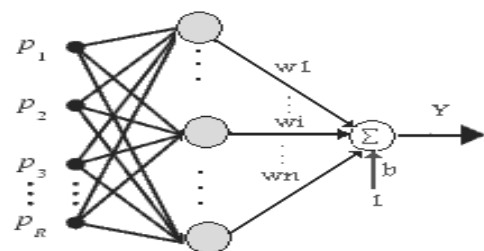
که در آن r ثابت چگالی هوا، c سرعت نوسانات و P جابجایی استاتور و c سرعت صوت در هوا می باشد. سپس برای بررسی اثر نوع ولتاژ اعمالی به فاز موتور بر روی میزان فشار سیگنال صوتی ناشی از نوسانات قطب استاتور، دو نوع ولتاژ به سیم پیچ استاتور اعمال می کند. یعنی یکبار ولتاژ پله ای که دارای تغییرات شدیدی از نظر اندازه می باشد و بار دیگر ولتاژ سینوسی که دارای تغییرات نسبتاً آرامی است، اعمال می شود. نتایج این آزمایش در شکل ۲ نشان داده شده اند [۶]. نتایج نشان می دهند که در حالت اعمال ولتاژ پله ای که دارای سرعت تغییرات زیادی در اندازه است، میزان نوسانات سیگنال صوتی یا نویز صوتی، بیشتر از حالتی است که ولتاژ سینوسی اعمال می شود. از مطالب بحث شده می توان نتیجه گرفت که تغییرات شدید ولتاژ اعمالی بر فاز موتور عامل مهمی است برای ایجاد نویز صوتی. در این مقاله با بکارگیری روشی مناسب، به جای آنکه ولتاژی با سرعت تغییرات زیاد حاصل از کلید زنی، بر فاز موتور اعمال شود سطح ولتاژ باس موتور توسط کنترل کننده شبکه عصبی تنظیم می شود در نتیجه نویز صوتی کاهش یافته و بر عمر مفید المانهای کلیدزنی فازها نیز افزوده می شود.



شکل ۳: بلوک دیاگرام روش ارائه شده در مقاله برای کنترل سرعت موتور SR و کاهش نویز صوتی



شکل ۵: کنترل کننده سرعت از نوع کنترل کننده جریان هیستریزس



شکل ۴: شمای یک شبکه عصبی از نوع RBF

$$J \frac{dw}{dt} = \Gamma - \Gamma_l - f \cdot w \quad (11)$$

$$w = \frac{dq}{dt} \quad (12)$$

که در آن V ولتاژ اعمال شده بر فاز موتور، I جریان هر فاز، R مقاومت سیم پیچ های هر فاز، Ψ شار پیوندی سیم پیچ ها، Γ_l گشتاور بار، f ضریب اصطکاک ماشین، q موقعیت روتور و w سرعت چرخش روتور می باشند. زاویه وصل و قطع هر فاز موتور در نوع رفتار موتور تاثیر گذار می باشد. در این مقاله برای ایجاد پروفیل گشتاور مناسب (عدم تولید گشتاور منفی در هر فاز) بر اساس سعی و خطا، زاویه وصل و قطع هر فاز در ۱۵ و ۳۸ درجه تنظیم می شوند. با بکارگیری روش کنترلی جریان هیستریزس (شکل ۵)، پروفیل اندوکتانس، جریان و گشتاور یک فاز نمونه موتور به صورت شکل ۶ حاصل می شوند.

۴-۲- شبیه سازی روش معرفی شده و بررسی نتایج

در این قسمت روش ارائه شده بر روی موتور SR شبیه سازی می شود و نتایج آن با نتایج روش کنترل جریان هیستریزس مقایسه می گردند.

الف: بررسی میزان تغییرات نیروی شعاعی: در این قسمت

$$E = K_p \cdot e + K_I \cdot \int e \cdot dt \quad (6)$$

ضرایب K_p و K_I در این مقاله به ترتیب ۴ و ۳/۵ در نظر گرفته می شوند. تابع هزینه و الگوریتم تنظیم وزنها برای آموزش کنترل کننده شبکه عصبی به صورت زیر می باشند [۸].

$$x = \frac{1}{2} E^2 \quad (7)$$

$$\frac{\partial x(n)}{\partial w_i(n)} = -E(n)G(\|x_i(n) - t_i(n)\|) \quad (8)$$

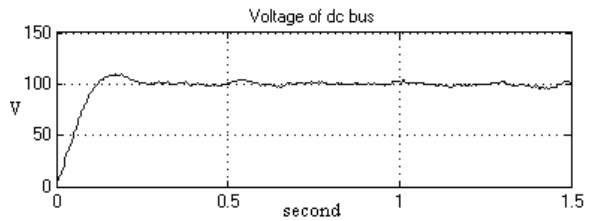
$$w_i(n+1) = w_i(n) - h \frac{\partial x(n)}{\partial w_i(n)} \quad (9)$$

۴- شبیه سازی

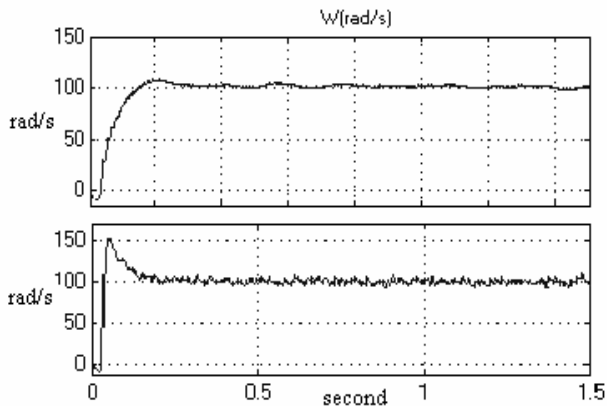
۴-۱- شبیه سازی موتور SR

برای شبیه سازی روش کنترلی پیشنهاد شده بر روی موتور SR از نوع ۶/۴، از مدلی که توسط مرجع [۹] برای مدلسازی موتور SR ارائه شده استفاده می گردد. بر این اساس، معادلات حاکم بر موتور عبارتند از

$$V = RI + \frac{d\Psi}{dt} \quad (10)$$



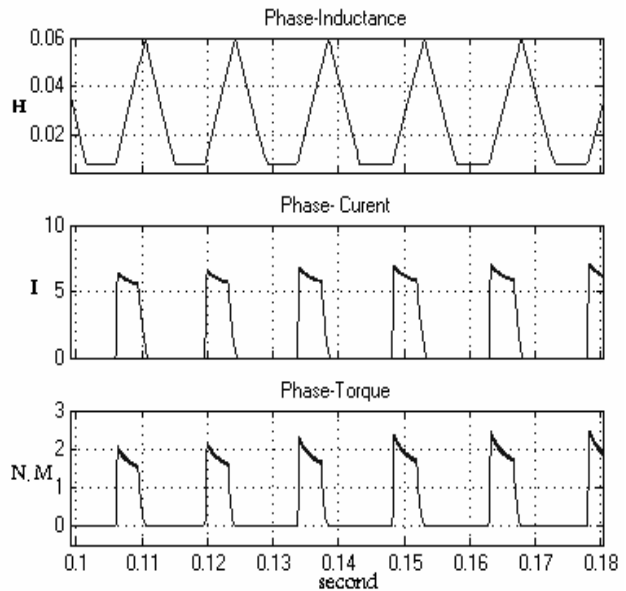
شکل ۸: سیگنال خروجی کنترل کننده شبکه عصبی، (ولتاژ مرجع باس موتور) در حضور نویز



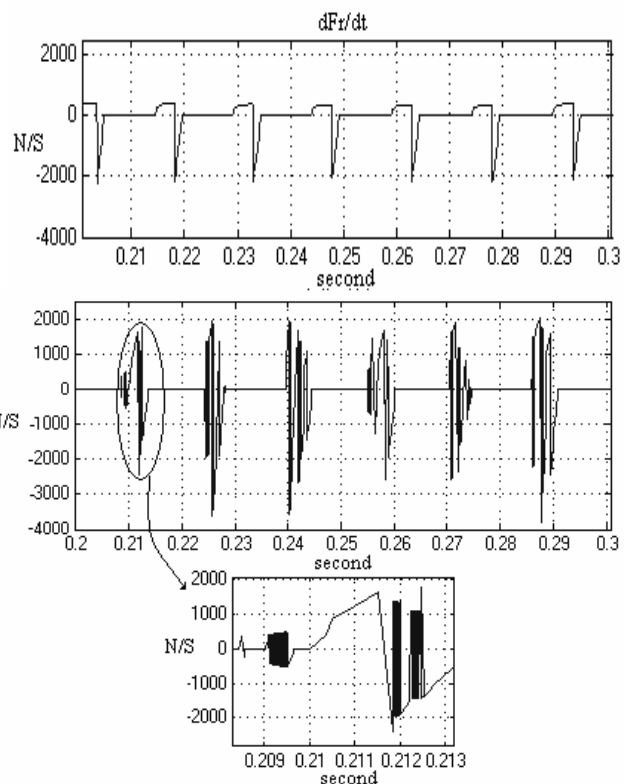
شکل ۹: سرعت موتور با بکارگیری روش ارائه شده در این مقاله (منحنی بالا) و با بکارگیری روش کنترل جریان هیستریز (منحنی پایین) در حضور نویز.

جریان هیستریز و دیگری با استفاده از کنترل کننده شبکه عصبی (روش ارائه شده)، به منظور کنترل سرعت بر روی موتور SR شبیه سازی می شوند. نتایج در شکل ۷ نشان داده شده اند. همانطور که مشاهده می شود، تغییرات نیروی شعاعی که مهمترین عامل ایجاد کننده نویز صوتی است، در حالت بکارگیری روش ارائه شده در این مقاله (منحنی بالا) نسبت به بکارگیری روش کنترلی جریان هیستریز (منحنی پایین)، به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته است. در نتیجه با بکارگیری روش ارائه شده، نویز صوتی تولیدی توسط موتور SR به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد.

ب: بررسی میزان مقاوم بودن نسبت به نویز: برای بررسی میزان مقاوم بودن روش کنترلی ارائه شده نسبت به نویز ورودی، سیگنال سرعت اندازه گیری شده موتور را به نویز که اندازه آن بین ۵ الی ۱۵ درصد اندازه سرعت مرجع است (در این آزمایش سرعت مرجع ۱۰۰ رادیان بر ثانیه می باشد)، آغشته می شود. برای این اساس، در روش ارائه شده، خروجی کنترل کننده شبکه عصبی (ولتاژ مرجع باس موتور SR) به صورت شکل ۸ بدست می آید. همچنین سرعت موتور که توسط دو روش ذکر شده کنترل گردیده (در حضور نویز ورودی)، نیز در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۶: شکل موج اندوکتانس (منحنی بالا)، جریان (منحنی وسط)، گشتاور تولیدی (منحنی پایین)، مربوط به یک فاز موتور SR پس از شبیه سازی



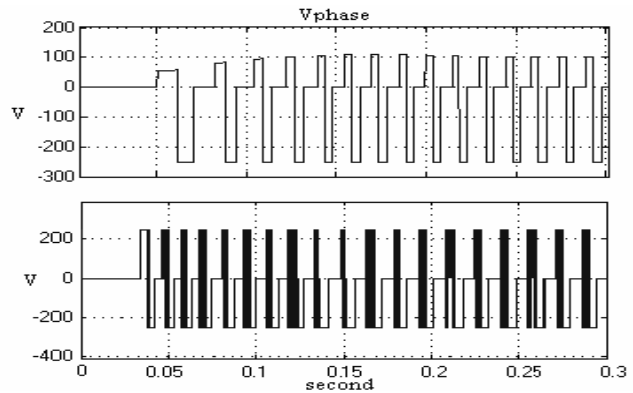
شکل ۷: مقایسه سرعت تغییرات نیروی شعاعی در بکارگیری کنترل کننده شبکه عصبی (منحنی بالا) و کنترل کننده حلقه هیستریز (منحنی پایین).

برای بررسی کاهش تغییرات نیروی شعاعی توسط بکارگیری روش معرفی شده، سیگنال $\frac{dF_r}{dt}$ را که در رابطه ۲ نشان داده شده است را برای دو حالت، یکی با استفاده از کنترل کننده

خودروهای هیبریدی که دارای محیطی حساس به نویز صوتی هستند، آسان تر می نمایند.

۶- مراجع

- [1] Z. Qionghua, W. Shuanghong, " Design of a 50kw switched reluctance machine for HEV propulsion system", *Proc. IEEE conf. on Vehicular Technology*, pp. 3207-3211, 2003.
- [2] G. E. Perez, P. M. Ortiz, " Passivity-based control of switched reluctance motors with nonlinear magnetic circuits", *IEEE Trans. Control System Technology*. Vol. 12, No. 3, pp. 439-448, May 2004.
- [3] D. E. Carneron, J. H. Lang, "The origin of acoustic noise in variable-reluctance motors", *IEEE Trans. Industry Applications*. Vol. 28, No. 3, pp.1250-1255, Nov. 1992.
- [4] R. Krishnan, R. Arunugam, "Design procedure for switched-reluctance motors", *IEEE Trans. Industry Applications*. Vol. 24, No. 3, pp. 456-461, 1988.
- [5] D. Panda and V. Ramanarayanan, "A composite control strategy for sensorless and low-noise operation of switched reluctance motor drive", *Proc. IEEE conf. on Industry Applications*, pp. 1751-1758, 2000.
- [6] P. O. Rasmussen, F. Blaabjerg, T. J. E. Miller, "Acoustic noise simulation for switched reluctance motors with audible output", *Proce. EPE 99-Lausanne*, pp. 1-13, 1999.
- [7] M. Takemoto, A. Chiba, " Radial force and torque of a bearingless switched reluctance motor operating in a region of magnetic saturation", *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 40, No. 1, pp. 103-112, Jan 2004.
- [8] S. Haykin, *Neural Networks*, Prentice Hall, 1999.
- [9] F. Soares, P. J. C. Branco, "Simulation of a 6/4 switched reluctance motor based on matlab/simulink environment", *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 37, No. 3, pp. 989-1009, July 2001.



شکل ۱۰: ولتاژ اعمالی بر روی یک فاز نمونه موتور، توسط بکارگیری روش ارائه شده در این مقاله (منحنی بالا) و توسط بکارگیری روش کنترل جریان هیستریز (منحنی پایین).

مشاهده می شود که سرعت موتور با بکارگیری کنترل کننده شبکه عصبی، نسبت به بکارگیری روش رایج کنترل جریان هیستریز در حضور نویز، دارای کیفیت بسیار بهتری می باشد. ج: بررسی سیگنال کنترلی: در این قسمت شکل موج ولتاژ اعمالی بر روی فازهای موتور با بکارگیری روش ارائه شده، بررسی می شود. شکل ۱۰ ولتاژ اعمالی بر هر فاز موتور SR، توسط بکارگیری دو روش ذکر شده را نشان می دهد. مشاهده می شود که با بکارگیری روش ارائه شده در این مقاله میزان کلیدزنیهای مورد نیاز برای کنترل سرعت موتور بسیار کمتر از حالتی است که از کنترل کننده جریان هیستریز استفاده می شود. در نتیجه با بکارگیری روش ارائه شده در مقاله، عمر مفید المانهای کلیدزنی نیز افزایش می یابد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله با معرفی و ارائه روشی جدید در کنترل سرعت موتور SR و با مقایسه با روش کنترلی رایج موتور SR به نام روش کنترلی جریان هیستریز، اولاً تغییرات نیروی شعاعی بسیار کاهش می یابد، در نتیجه تولید نویز صوتی کم می شود، ثانیاً این روش با بکارگیری کنترل کننده شبکه عصبی کنترل سرعت موتور را در مقابل نویز ورودی (موجود در سرعت اندازه گیری شده یا تخمین زده شده)، بسیار مقاوم می سازد، ثالثاً میزان تعداد کلیدزنیهای مورد نیاز بر روی فازهای موتور به میزان چشمگیری کاهش می یابد در نتیجه بر عمر مفید المانهای کلیدزنی، افزوده می گردد. مزایای ذکر شده گویای کارایی خوب این روش می باشند و همچنین بکارگیری موتور SR را در