شناسه ملی: ۱۴۰۰۷۲۳۶۸۳۵
شماره ثبت: ۲۵۴۲
تلفن: ۰۷۷۹۱۵۷۰۰۲۵_۰۹۳۷۰۰۹۵۰۰۰
آدرس: استان بوشهر، برازجان، خیابان ماحوزی،مرکز رشد علم و فناوری

شرکت پایا پردازش ویرا هیرون
(سهامی خاص)

Usage of Active Magnetic Bearing in Oil & Gas industry

Abstract

Active magnetic bearing (AMB) technology is used to overcome the deficiencies of conventional journal or ball bearings. They have shown their ability to work with no lubrication or to run at high speed. Utilizing a controller for the electrical current, active magnetic bearings could levitate the shaft of a pump, compressor or an electro motor in the center of a rotating space. There are numerous advantages to using magnetic bearings, the most notable aspect is being contact-free, and in that the magnetic force is used to support the rotating object enabling very high rotational speeds to be realized. Maintenance is also decreased due to the absence of surface wear. The noise would be decreased so much and consumption of energy drops because of avoiding friction loss. A unique ability of an AMB versus conventional bearings is changing the characteristics of the bearings during operation. These characteristics correspond to the stiffness and damping of conventional bearings that are tuned via a digital feedback control system. The control system uses the PID algorithm in order to tune the current in the electro magnets. This current produces magnetic force. The magnetic force used in magnetic bearings can be divided into two categories of how the force is created: reluctance force and Lorentz force. In this paper, it would be shown that how active magnetic bearing uses the reluctance force that results from a difference of magnetic permeability between two materials to levitate the shafts of rotating equipments by the aid of ferromagnetic materials.

Keywords: Electro magnet, Magnetic Field, Control System, Sensor, Amplifier, Rotor

کاربرد بيرينگ مغناطيسي فعال در صنعت نفت و گاز

چكيده

تكنولوژي، طراحي و بكارگيري بيرينگ مغناطيسي فعال (AMB) بمنظور رفع ضعفها در بيرينگهاي متعارف مي‌باشد. ويژگي بزرگ اين بيرينگها كار در سرعتهاي بسيار بالا بدون استفاده از سيستم روغن‌كاري است. بيرينگهاي مغناطيسي با بهره گيري از يك كنترلر جريان الكتريكي، معلق شدن شفت موتورها، كمپرسورها و يا پمپها را در مركز فضاي چرخش امكانپذير مي سازند. عدم وجود تماس مكانيكي بين سطح دوار و سطح ثابت بدنه، امكان دستيابي به سرعتهاي بسيار بالا و كاهش شديد تعميرات دورهاي به دليل نبود سايش را فراهم مي‌آورد. با حذف تلفات اصطكاك، سر و صدا، لرزش و مصرف انرژي نيز كاهش قابل ملاحظه‌اي مي‌يابد. قابليت ويژه بيرينگها مغناطيسي نسبت به بيرينگهاي متعارف تغيير پارامترهاي معادل فنريت (Stiffness) و ميرايي (Damping) است، كه با كنترلر فيدبك دار تنظيم مي‌شوند. اين كنترلر از الگوريتم PID براي تنظيم جريان در الكترومگنتها استفاده مي‌كند و به وسيله همين جريان است كه نيروي مغناطيسي ايجاد مي‌شود. به طور كلي نيروهاي مغناطيسي به دو دسته تقسيم مي‌شوند: نيروي رلوكتانسي و نيروي لورنتز. در اين مقاله نشان داده مي‌شود كه چگونه بيرينگ مغناطيسي فعال با استفاده از نيروي رلوكتانسي كه از اختلاف نفوذپذيري مغناطيسي بين دو جسم حاصل مي‌شود به كمك مواد فرومغناطيس، شفت تجهيزات دوار را به صورت معلق در هوا نگه مي‌دارد.

واژه‌هاي كليدي: الكترومگنت، ميدان مغناطيسي، سيستم كنترل، سنسور، تقويت كننده، روتور

مقدمه

به طور كلي، تجهيزات دوار در صنعت كاربرد بسياري دارند و تمام اين تجهيزات به دليل وجود بخش‌هاي متحرك نياز به تعمير و نگهداري دارند و باعث ايجاد نويز صوتي و مصرف بالاي انرژي مي‌شوند. بيرينگ يكي از مهم‌ترين بخش‌هاي اين تجهيزات است كه وظيفه تعليق بخش متحرك را به عهده دارد. در بيرينگهاي مكانيكي متعارف مثل Ball Bearing، Roll Bearing و Bush Bearing به دليل وجود اصطكاك، اكثر مشكلات مربوط به تعمير و نگهداري در تجهيزات دوار را به خود اختصاص مي‌دهد و در بيرينگهاي هيدروليكي (Oil Film Bearing) نيز به علت پيچيدگي سيستم و فشار زياد روغن حجم بالايي از كار تعمير و نگهداري با هزينه بالا بايد انجام شود. ضمناً به دليل تلفات ناشي از اصطكاك ميزان مصرف انرژي نيز افزايش پيدا مي‌كند و همچنين باعث ايجاد محدوديت در سرعت بالا مي‌گردد. لذا واضح است در صورت حذف عامل اصطكاك مزاياي زيادي براي تجهيزات دوار به وجود مي‌آيد. با استفاده از بيرنگهاي مغناطيسي فعال مي‌توان عامل اصطكاك را حذف كرد. در اين بيرينگها عملاً هيچ تماسي بين بخش دوار و ثابت وجود ندارد و بخش دوار به كمك نيروي مغناطيسي در هوا معلق مي‌ماند و همچنين هيچ محدوديتي براي سرعت وجود نخواهد داشت. به طور كلي بيرينگهاي مغناطيسي سه نوع هستند، شامل غيرفعال، فعال و هيبريد. در نوع غيرفعال از آهنرباهاي دائمي براي معلق كردن شفت استفاده مي‌شود كه ميدان مغناطيسي ثابتي دارند. در نوع فعال از آهنرباهاي الكتريكي (Electro Magnet) براي ايجاد ميدان استفاده مي‌شود كه شدت ميدان آنها را مي توان با تغيير جريان بر اساس نياز پروسه تنظيم كرد و نوع هيبريدي كه از هر دو نوع قبلي سود مي‌برد. در مقاله حاضر كه با هدف استفاده از اين تكنولوژي از نوع فعال در صنايع نفت وگاز تنظيم شده، اصول طراحي و ساخت بخشهاي مختلف اين وسيله بيان گرديده است.

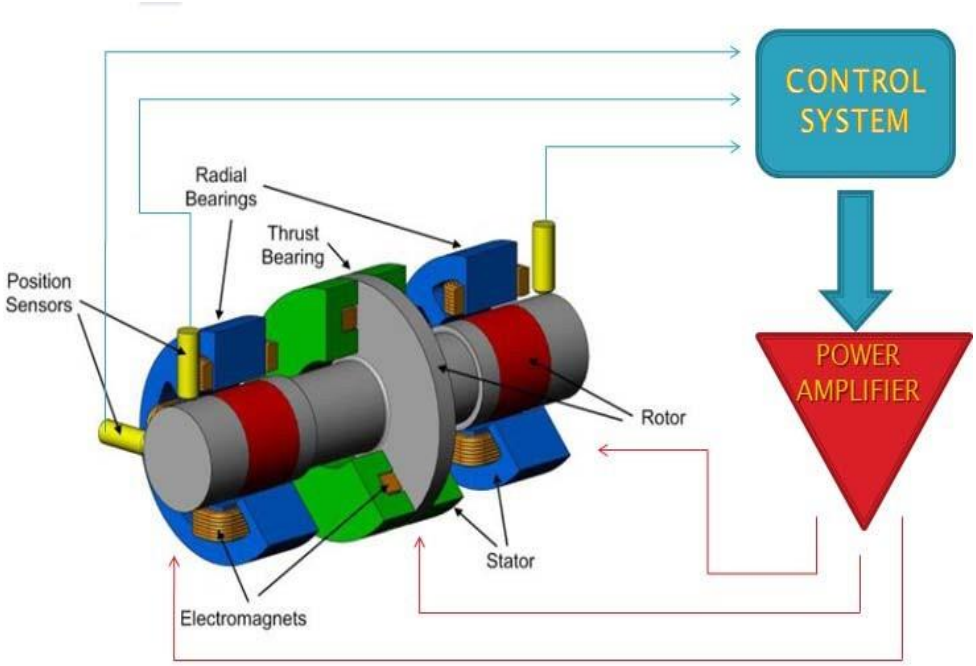
ساختار كلي بيرينگ مغناطيسي فعال

اين بيرينگها شامل چند بخش اصلي مي‌شوند كه به ترتيب: الكترو مگنتهاي شعاعي(Radial Bearing) و محوري(Thrust Bearing)، سنسورهاي موقعيت(Position Sensor)، سيستم كنترل (Control System) و تقويت‌كننده‌هاي قدرت(Power Amplifier) هستند.

همچنين براي كامل شدن بيرينگ مغناطيسي نياز است تغييراتي روي شفت نيز ايجاد شود. همانطور كه در شكل 1 نشان داده شده است يك ديسك و ورقه‌هاي فرومغناطيسي (Ferro Magnetic) روي شفت نصب شده اند (بخش قرمز رنگ). ديسك نصب شده كه از جنس مواد فرومغناطيس است به عنوان مسير ميدان مغناطيسي حاصل از بيرينگ محوري روي شفت استفاده مي‌شود. چگونگي ايجاد اين شار مغناطيسي در ادامه مقاله توضيح داده خواهد شد. ورقه‌هاي از جنس مواد فرومغناطيس نيز به تقويت ميدان مغناطيسي حاصل از بيرينگهاي شعاعي روي بدنه روتور كمك زيادي مي‌كنند.

مكانيزم كار يك سيستم كامل بيرينگ مغناطيسي كه شامل دو عدد بيرينگ شعاعي در دو سر شفت و يك بيرينگ محوري در يكي از دو سر شفت مي‌شود به اين صورت است كه سنسورهاي موقعيت كه حداقل سه عدد مي باشند (دوعدد براي بيرينگهاي شعاعي و يك عدد براي بيرينگهاي محوري)، موقعيت شفت را با دقت بسيار بالا براي سيستم كنترل فراهم مي‌كند. سپس سيستم

کنترل با تنظيم جريان الكترومگنتها، شدت ميدان مغناطيسي را كنترل مي‌كند به طوري كه شفت در مركز فضاي ثابت بماند. همين كار براي بيرينگ محوري نيز انجام مي‌شود و با استفاده از يك سنسور كه در راستاي محور شفت و در يكي از دو سر شفت نصب شده است، موقعيت محوري شفت نيز آشكار مي‌شود تا سيستم كنترل بتواند به درستي جريان الكترومگنتهاي محوري را نيز تنظيم كند. به علت ضعيف بودن سيگنال كنترلي توليد شده توسط سيستم كنترل، اين سيگنال نمي‌تواند به صورت مستقيم به الكترومگنتها اعمال شود، پس لازم است كه توان اين سيگنال كنترل با نسبتي مشخص تقويت گردد كه اين كار توسط تقويت‌كننده‌هاي قدرت انجام مي‌شود.



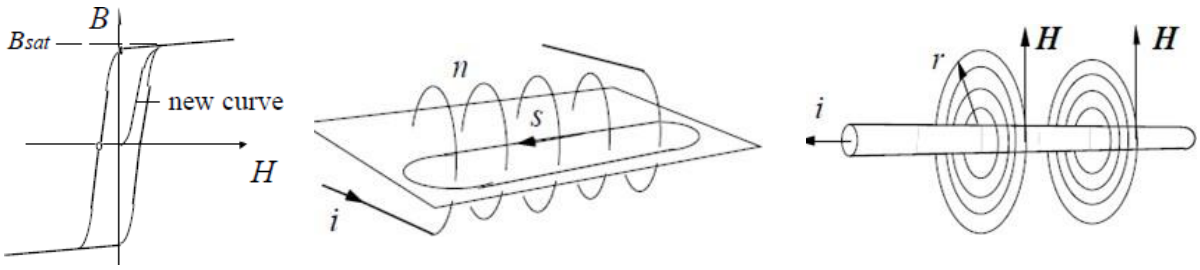
شكل 1– ساختار كلي بيرينگ مغناطيسي فعال

مباني مغناطيس

در اين قسمت به طور خلاصه چگونگي به وجود آمدن ميدان مغناطيسي از جريان الكتريكي و سپس به وجود آمدن نيرو از ميدان مغناطيسي توضيح داده شده است.

در شكل 2 وضعيت ميدان مغناطيسي اطراف يك سيم حامل جريان الكتريكي نشان داده شده است. i (آمپر) جريان الكتريكي را نشان مي دهد و H(A/m) شدت ميدان مغناطيسي را نشان مي دهد كه جهت آن به وسيله قانون دست راست مشخص مي‌گردد. در مدارهاي مغناطيسي نياز است كه مسير خطوط ميدان مغناطيسي به صورت مستقيم باشد، لذا سيم حامل جريان پيچانده شده و به صورت سيم‌پيچ در مي‌آيد كه در اين حالت خطوط ميدان در مركز سيم‌پيچ مستقيم خواهند بود (مطابق شكل3).

شناسه ملی: ۱۴۰۰۷۲۳۶۸۳۵
شماره ثبت: ۲۵۴۲
تلفن: ۰۷۷۹۱۵۷۰۰۲۵_۰۹۳۷۰۰۹۵۰۰۰
آدرس: استان بوشهر، برازجان، خیابان ماحوزی،مرکز رشد علم و فناوری



شکل 2– میدان مغناطیسي اطراف سیم حامل جریان الکتریکي

شکل 3– میدان مغناطیسي در مرکز سیمپیچ حامل جریان الکتریکي

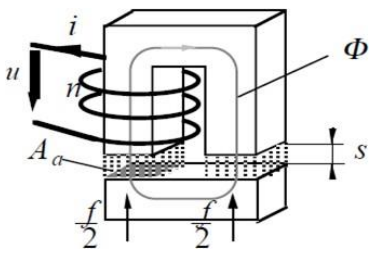
شکل 4– نمودار هیسترزیس و اشباع مغناطیسي

همانطور که در معادله (1) نشان داده شده است، انتگرال سطحي شدت میدان مغناطیسي با جریان سیم و تعداد دور سیمپیچ متناسب است و شدت میدان مغناطیسي طبق معادله (2) با چگالي شار مغناطیسي B(Tesla) مرتبط مي‌شود. μ_0 در معادله (2) ضریب نفوذپذیري خلاء در مقابل میدان مغناطیسي را نشان مي‌دهد و معادل $4\pi \times 10^{-7}$ است. μ_r نیز ضریب نفوذپذیري مغناطیسي سایر اجسام نسبت به خلاء مي‌باشد و آن را ضریب نفوذپذیري نسبي مي‌نامند که مقدار براي خلاء عدد 1 است.

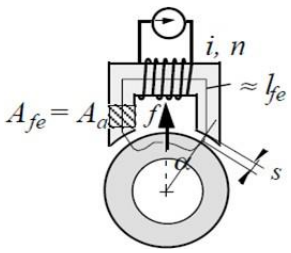
$$B = \mu_0 \mu_r (H) H \qquad (2)$$

$$\int_{\circ} Hds = ni \qquad (1)$$

با استفاده از مواد فرومغناطیس که μ_r در آنها بسیار بزرگتر از 1 است، خطوط میدان مي‌توانند در مرکز هسته متمرکز شوند. رفتار این مواد معمولاً به صورت نمودار B-H (شکل4) نشان داده مي‌شود. در این نمودار پدیده هیسترزیس و اشباع هسته مغناطیسي قابل مشاهده است. در حالت اشباع، با افزایش جریان الکتریکي و در نتیجه آن میدان مغناطیسي، چگالي شار مغناطیسي افزایش نمي یابد. شکلهاي 5 و 6 نشان مي‌دهند چگونه نیرو در بیرینگ مغناطیسي به وجود مي آید.



شکل 5- وضعیت نیرو در یك الکترومگنت



شکل 6- وضعیت قرارگرفتن یك الکترومگنت در بیرینگ مغناطیسي شعاعي

این شكلها مسير شار مغناطيسي Φ را در يك الكترومگنت دوقطبي را نشان مي‌دهند كه بخشي از يك بيرينگ مغناطيسي شعاعي است. با فرض همگن بودن شار درون هسته و درون فاصله هوايي (s) و يكسان بودن سطح مقطع هسته و فاصله هوايي ($A_a = A_{fe}$)، چگالي شار كلي با چگالي شار فاصله هوايي مساوي است ($B = B_a$). نيروي به وجود آمده را مي‌توان از طريق معادله انرژي ذخيره شده در فاصله هوايي (W_a) محاسبه كرد.

$$W_a = \frac{1}{2} B_a H_a V_a = \frac{1}{2} B_a H_a A_a 2s \qquad (3)$$

نيرويي كه روي شفت اعمال مي‌شود از ميدان مغناطيسي درون فاصله هوايي به وجود مي‌آيد. براي جابجايي‌هاي كوچك (ds)، شار مغناطيسي($B_a A_a$) ثابت است. وقتي طول فاصله هوايي افزايش مي‌يابد، حجم فاصله هوايي ($V_a = 2sA_a$) نيز افزايش مي‌يابد و تغييرات W_a هم dW نشان داده مي‌شود، پس مي‌توان معادله آن را به صورت زير بيان كرد:

$$f = \frac{dW}{ds} = B_a H_a A_a = \frac{B_a^2 A_a}{\mu_0} \qquad (4)$$

خارج از محدوده اشباع هسته، نيروي به وجود آمده تابعي از جريان سيم‌پيچ و فاصله هوايي مي‌باشد كه معادله آن به صورت زير است (معادله 5):

$$f = \mu_0 A_a \left(\frac{ni}{2s}\right)^2 = \frac{1}{4}\mu_0 n^2 A_a \frac{i^2}{s^2} = k\frac{i^2}{s^2} \qquad (5)$$

در معادله (5) نشان داده شد كه نيروي به وجود آمده با مجذور جريان رابطه مستقيم و با مجذور فاصله هوايي رابطه عكس دارد. براي يك بيرينگ محوري واقعي، نيروي حاصل از قطبهاي مغناطيسي نه به صورت مستقيم كه با زاويه‌اي مشخص( ) روي روتور اثر مي‌گذارند (شكل 5). براي يك بيرينگ محوري با چهار الكترو مگنت اين زاويه معادل 22.5° است. حال بادر نظر گرفتن اثر اين زاويه معادله (5) به شكل زير در مي آيد:

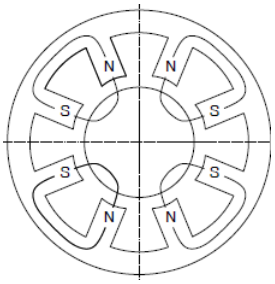
$$f = \frac{1}{4}\mu_0 n^2 A_a \frac{i^2}{s^2}\cos\alpha = k\frac{i^2}{s^2}\cos\alpha \qquad (6)$$

بيرينگهاي شعاعي و محوري در عمل

در بيرينگهاي شعاعي خطوط ميدان طبق اصولي كه در بخش قبل توضيح داده شد نيروي مغناطيسي از 4 جهت به شفت اعمال مي‌شود و شفت را در وسط فضاي چرخش ثابت نگه مي‌دارد (شكل 7 و 8). در بيرينگهاي محوري اصول ايجاد نيرو نيز يكسان است با اين تفاوت كه نيروي مغناطيسي با بسته شدن خطوط ميدان داخل يك ديسك كه روي شفت نصب مي‌شود، اعمال مي‌گردد.

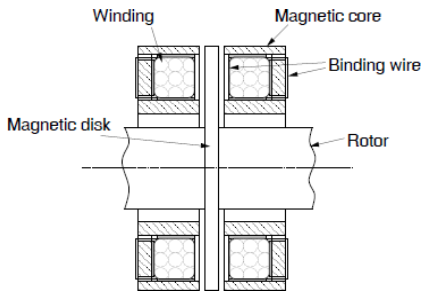
این نیرو توسط دو الکترو مگنت محوري که در دو سمت این دیسك قرار دارند ایجاد مي‌شوند که با اعمال جریان الکتریکي به هر کدام از آنها، دیسك را به سمت خود مي‌ربایند (شکل9 و10). با تنظیم جریان الکتریکي مناسب توسط کنترلر، دیسك در مرکز فضاي چرخش بین دو الکترومگنت باقي مي‌ماند.

شکل 7- نمونه ساخته شده بیرینگ شعاعي



شکل8- وضعیت خطوط میدان در بیرینگ شعاعي

شکل 9- نمونه ساخته شده بیرینگ محوري



شکل 10- وضعیت قرار گرفتن بیرینگ محوري نسبت به دیسك

سیستم کنترل

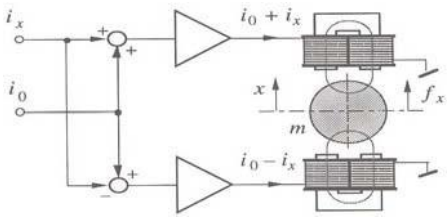
سیستم کنترل در بیرینگ مغناطیسي جریان الکتریکي اعمال شده به الکترومگنتها را تنظیم مي‌کند. جریان الکتریکي با اجراي الگوریتم PID کنترل مي‌شود. طبق معادله (7)، کنترل کننده PID[1] یك کنترل کننده حلقه بسته است که با فیدبك گرفتن از شرایط واقعي پروسه توسط یك سنسور و مقایسه آن با شرایط ایده آل، میزان خطاي سیستم را محاسبه کرده و عملگرهاي تناسبي (P)، انتگرال گیر (I) و مشتق گیر (D) را به میزان خطا اعمال مي‌کند. در نهایت با جمع کردن این سه عملگر خروجي سیستم کنترل به دست مي آید که هدف آن به صفر رساندن خطا و رساندن پروسه به شرایط ایده آل است. در اینجا $e(t)$ میزان خطا و $i(t)$ جریان خروجي سیستم کنترل است که براي یك بیرینگ مغناطیسي شرایط ایده آل، نگه داشتن شفت در مرکز فضاي چرخش مي باشد. اجراي این الگوریتم در عمل باید با سیستم کنترل بدون وقفه (REAL TIME) زیرا به علت کوچك بودن فاصله

[1] PROPERTIONAL, INTEGRAL, DIFFERENTIAL

هوايي بين الكترو مگنتها و شفت (حدوداً 0/6 ميليمتر)، در صورت خارج شدن شفت از موقعيت خود سيستم كنترل فرصت بسيار كمي براي تصحيح جريان الكتريكي دارد. براي اين منظور نياز است از پردازشگرهاي پرسرعت مانند DSP[2] استفاده كرد.

$$i(t) = P.e(t) + I.\int e(t)dt + D.\frac{de(t)}{dt} \qquad (7)$$

سيگنال خروجي سيستم كنترل از نوع PWM[3] مي باشد كه به صورت سوئيچينگ سيگنال خروجي را توليد مي‌باشد و ميزان DUTY CYCLE براي PWM را كنترل كننده PID تعيين مي‌باشد. از آنجا كه خروجي سيستم كنترل جريان بسيار پائيني دارد نمي‌تواند توان لازم براي كار الكترومگنتها را تأمين كند در نتيجه لازم است سيگنال خروجي سيستم كنترل با يك نسبت مشخص افزايش يابد. كه اين كار توسط تقويت‌كننده‌هاي قدرت انجام مي‌شود. معمولاً براي ساده‌تر كردن سيستم كنترل در بيرينگهاي مغناطيسي از روش تفاضلي(DIFFERENTIAL) استفاده مي‌شود. در اين روش مي توان با يك سيگنال كنترل، دو تقويت كننده مربوط به الكترومگنتهايي كه قرينه هم هستند را راهاندازي كرد (شكل11). در اين روش از يك سيگنال ثابت (i_0) و يك سيگنال كنترل (i_x) استفاده شده است كه با تغيير سيگنال كنترل، نيروي برايند هر دو الكترومگنت تغيير مي‌باشد.



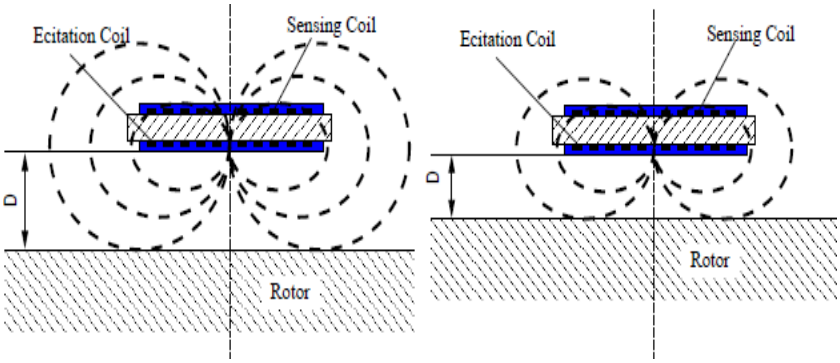
شكل 11- استفاده از روش تفضلي براي راه اندازي دو الكترومگنت

سنسور موقعيت

اين سنسورها موقعيت سه بعدي شفت را براي سيستم كنترل روشن مي‌كنند. به دليل كوچك بودن فاصله‌اي كه بايد اندازه‌گيري شود و نياز به دقت بالا تنها سنسورهاي خاصي هستند كه اين قابليت را دارند. اين سنسورها از نوع جريان گردابي (CURRENT EDDY) مي باشند كه دقتي در حدود ميكرون (10^{-6} متر) ارائه مي دهند. به طور كلي در اين سنسورها دو سيم پيچ وجود دارد كه يكي از آنها سيم پيچ تحريك (EXITATION COIL) و ديگري سيم پيچ (SENSING COIL) حسگر مي‌باشد. با اعمال ولتاژ به سيم‌پيچ تحريك يك ميدان مغناطيسي ايجاد مي‌شود كه با توليد جريان گردابي روي سطح هدف (شفت) مي‌گردد. اين جريان گردابي نيز باعث القاء ولتاژ روي سيم‌پيچ سنسور مي‌گردد (شكل 12). اين ولتاژ با تغييرات فاصله بين سنسور و هدف (D) به صورت غيرخطي تغيير مي‌كند كه براي خطي كردن آن مي توان از يك پردازش كننده سيگنال استفاده كرد تا بتوان از

[2] DIGITAL SIGNAL PROCESSOR
[3] PULSE WIDTH MODULATION

سيگنال خروجي سنسور در سيستم كنترل استفاده كرد. اين سنسورها با دقت و فركانس كاري مختلف ساخته مي شوند. منظور از فركانس كاري اين است كه اگر سطح هدف دچار نوسان شود و فركانس نوسان از حد تعيين شده براي سنسور بگذرد، سنسور ديگر دقتي را كه براي آن اعلام شده نخواهد داشت.



شكل 12- سنسور جريان گردابي

نتيجه گيري

با توجه به مطالب بيان شده و تجارب استفاده از بيرينگ مغناطيسي در پروژه هاي مختلف، نصب بيرينگ مغناطيسي روي تجهيزات دوار مي تواند تأثير زيادي در افزايش كارايي آنها داشته باشد. به خصوص در صنايع نفت و گاز كه تجهيزات دوار نظير توربو ژنراتورها، توربو اكسپاندرها، توربو كمپرسورها و الكترو موتورهاي پر قدرت استفاده مي شوند، اين تكنولوژي مي تواند باعث كاهش حداقل 40 درصدي مصرف انرژي شود. علت اصلي به وجود آمدن سر و صدا در تجهيزات دوار، بيرينگ مكانيكي آنها و لرزش هاي ناشي از خرابي اين بيرينگها است. با جايگزين كردن بيرينگهاي مكانيكي با بيرينگ مغناطيسي به علت عدم تماس بخش ثابت و دوار و قابليت كنترل لرزش با تنظيم درست پارامترهاي سيستم كنترل مي توان سروصدا را به حداقل رساند.

در اين بيرينگها سيستم روغن كاري حذف مي گردد كه اين خود مزيت بزرگي را نسبت بيرينگهاي مكانيكي و هيدروليكي ايجاد مي كند. در بيرينگها مكانيكي پمپهاي بزرگ بزرگ مثل پمپهاي صادرات نفت نياز است يك مسير براي گردش و خنك كاري روغن با استفاده از پمپ روغن و يك راديياتور براي خنك كاري نصب شود. اين مسير نياز به تعميرات را اضافه كرده واطمينان پذيري سيستم را پايين مي آورد به اين صورت كه اگر پمپ روغن از كار بيافتد يا راديياتور سوراخ شود، پمپ صادرات نفت از سرويس خارج مي گردد. براي بيرينگها هيدروليك نيز به دليل بالا بودن فشار روغن، پمپ روغن قوي تر و خنك كاري سريعتر نياز است كه در بيرينگ مغناطيسي به هيچكدام نيازي نيست.

يكي از مهمترين قابليتهاي بيرينگهاي مغناطيسي قابليت كار در سرعتهاي بسيار بالا است. مهمرين عامل محدود كننده سرعت در بيرينگهاي مكانيكي اصطكاك است كه سرعت چرخش در اين بيرينگها را تا 3000 درو بر دقيقه محدود كرده است. به علت

حذف اصطكاك در بيرينگهاي مغناطيسي مي توان سرعت را بسيار بالاتر يعني در حدود 50000 دور بر دقيقه رساند كه ميزان دقيق آن بستگي به وضعيت ايروديناميك روتور و توانايي تحمل نيروي گريز از مركز اجزاء آن دارد. اين قابليت باعث مي شود بيرينگ مغناطيسي گزينه مناسبي براي استفاده در تجهيزات دوار پر سرعت مثل توربينها باشد.

بيرينگهاي مغناطيسي فعال يك قابليت منحصر به فرد دارند كه نتظيم پارامترهاي فنريت (Stiffness) و ميرايي (Damping) است. اين پارامترها در بيرينگهاي مكانيكي بسته به نوع متريال مورد استفاده در آنها تعيين مي شوند و ثابت مي باشند. در حالي كه در يك بيرينگ مغناطيسي فعال مي توان به راحتي و با تغيير پارامترهاي كنترلر براساس نياز پروسه آنها را تغيير داد.

با وجود تمام اين مزيتها، محدوديتهايي نيز براي اين نوع بيرينگها وجود دارد. اين بيرينگها از بابت هزينه از بيرينگهاي مكانيكي گرانتر هستند و براي ساخت آن بايد از افراد متخصص و تكنولوژي پيشرفت و متريال خاص جهت طراحي، ساخت، نصب و راه اندازي استفاده كرد كه همشه در دسترس نيستند. همچنين براي استفاده در محيطهاي با حرارت بالا ميزان نيروي توليد شده توسط الكترو مگنتها كاهش مي يابد و براي رفع آن بايد در طراحي اثر دما روي ميدان مغناطيسي را در نظر گرفت و از متريال سازگار با دماي بالا استفاده كرد.

مراجع

1- Schweitzer Gerhard, Bleuler Hannes, and Traxler Alfons “Active Magnetic Bearings” Number ISBN 3 7281 2132 0, 1th Edition, Hochschulverlag AG der ETH Zurich, 1994.

2- Schweitzer Gerhard, “Active Magnetic Bearings – Chances and Limits” In proceeding of 6th International Conference of Rotor Dynamics, Sydney, 2002.

3- Siegwart Roland, Bleuler Hannes, and Traxler Alfons, “Mechatronic System Techniques and Applications, Chapter Industrial Magnetic Bearings – Basics and Applications” 4th Edition, Gordon Breach Science Publisher, 2000.

4- Schweitzer Gerhard, “Safety and Reliability Aspects for Active Magnetic Bearing Applications” Journal of Systems and Control Engineering, 2005, vol. 219, 6 pages.

5- Burdet Luc, “Active Magnetic Bearing Design and Characterization for High Temperature Applications” Degree of Doctor of Sciences, EFPL University, Lausanne – Swiss, 137 pages, 2006.