



طراحی و ساخت حسگر روگوفسکی برای اندازه‌گیری جریان پلاسمای توکامک الوند

عیدان، آنا^(۱) - صادقی، یحیی^(۲) - شیرانی، بابک^(۳) - زمانیان، حامد^(۴)

^(۱) دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری نوین، گروه مهندسی هسته‌ای

^(۲) سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فیزیک پلاسما و گداخت

چکیده:

حسگر روگوفسکی شامل پیچ‌های روگوفسکی و انتگرال‌گیر مربوط به آن برای اندازه‌گیری مشخصه‌های جریان پلاسما در توکامک الوند، طراحی و ساخته شد. طراحی این حسگر به گونه‌ای انجام شده که پاسخ فرکانسی آن از 0.707 Hz تا 105 kHz (این محدوده‌ی فرکانسی در بردارنده‌ی فرکانس کاری سیستم مورد آزمایش (60 Hz) است) خطی است. این پیچ با طول فرم‌دهنده‌ای کافی و فضای کم، به راحتی محفظه خلأ توکامک را در برمی‌گیرد و دو انتهای آن بدون شکاف هم‌ردیف می‌شوند. لذا از تداخل میدان‌های مغناطیسی رساناهای مجاور و سایر منابع جلوگیری به عمل آمده است. به عبارت دیگر نسبت به تغییر موقعیت مرکزی جریان پلاسما ایمن خواهد بود. این حسگر پس از انجام مراحل کالیبراسیون، بر روی توکامک الوند نصب گردید و نتایج تجربی تست حسگر در شرایط حضور پلاسما در این مقاله ارائه می‌شود.

کلمات کلیدی: حسگر جریان، پلاسمای توکامک، پیچ روگوفسکی، مدار انتگرال‌گیر، کالیبراسیون

مقدمه:

توزیع جریان اساسی‌ترین مشخصه پلاسمای توکامک است که اندازه‌گیری آن در خارج از پلازما، برای کنترل عملکرد توکامک بسیار حائز اهمیت است [۱]. همچنین این پارامتر در تعیین مقاومت پلازما، چگالی توان گرمایش اهمی و چگالی انرژی پلاسما توکامک مورد استفاده قرار می‌گیرد. از حسگر روگوفسکی برای اندازه‌گیری جریان‌های متغیر و گذرا بر اساس قانون القای الکترومغناطیسی فارادی استفاده می‌شود [۲]. پیچ‌های روگوفسکی به‌طور گسترده در پلاسماهای حلقوی مانند توکامک، مورد استفاده قرار می‌گیرد و می‌تواند جریان و مشتق جریان پلاسما را اندازه‌گیری کند.

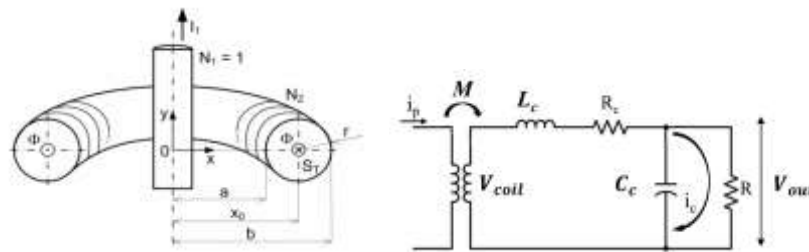
روش کار

طراحی حسگر روگوفسکی: مدار معادل پیچ مشابه شکل (۱-الف) است که در آن L_c و r_c به ترتیب اندوکتانس و مقاومت اهمی پیچ هستند. با توجه به مدار معادل پیچ و با صرف نظر از خازن پراکنندگی می‌توان نوشت:

$$L_c \frac{di}{dt} + (r + r_c)i = M \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

یکی از ویژگی‌های مهم در طراحی پیچ‌های روگوفسکی زمان مشخصه‌ی پیچ‌های مغناطیسی مطابق با رابطه‌ی (۲) است. این زمان باید تا حد ممکن کوچک باشد تا تمام هارمونیک‌های سیگنال را دنبال نماید.

پارامتر $\tau = \frac{L_c}{R}$ نشان دهنده‌ی کوچک‌ترین فاصله‌ی زمانی تغییر در پلاسما است که پیچه می‌تواند آن را تفکیک کند و یا به عبارت دیگر مدت زمانی که طول می‌کشد تا میدان به داخل پیچه نفوذ کند، لذا مشخصه‌ای تحت عنوان پاسخ فرکانسی مطرح خواهد شد. طبق تعریف پاسخ فرکانسی، فرکانس‌هایی با بزرگی مشابه یا کمتر از فرکانس مشخصه قابل اندازه‌گیری است.



(الف)

(ب)

شکل (۱): الف- مدار معادل پیچه روگوفسکی ب- مقطع دایروی حسگر برای محاسبه اندوکتانس خودی

$$\frac{L_c}{R} = \frac{L_c}{r + r_c} = \tau \quad (۲)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{R}{L_c} \quad (۳)$$

طراحی این حسگر به گونه‌ای صورت گرفته که در بردارنده‌ی فرکانس کاری توکامک الوند (یعنی ۶۰ Hz) است (پهنای باند حسگر از ۰/۷۰۷ Hz تا ۱۵ kHz است) و می‌تواند پاسخگوی تغییرات سیستم باشد. برای این منظور، با توجه به رابطه‌ی اندوکتانس خودی و متقابل در سطح مقطع دایروی (روابط (۴) و (۵)) مطابق با شکل (۱-ب)، پارامترهای ساختاری این پیچه محاسبه گردید. عواملی مانند طول فرم دهنده پیچه متناسب با شعاع محفظه خلأ توکامک و محدودیت‌های فضایی نیز در این محاسبات لحاظ شده‌اند.

$$M_{21} = \frac{\mu_0 N_2}{2} (a + b - 2\sqrt{ab}) \quad (۴)$$

$$L_2 = \frac{\mu_0 N_2^2}{2} (a + b - 2\sqrt{ab}) \quad (۵)$$

ساخت حسگر روگوفسکی: به لحاظ ساختاری این حسگر، یک سیم‌پیچ با $N=۳۳۶۶$ دور است که بر روی یک هسته‌ی غیرمغناطیسی از جنس تفلون و به شعاع هسته‌ی $\frac{b-a}{2} = ۰/۵۵$ cm پیچیده شده است. ضریب نفوذپذیری تفلون نزدیک به ضریب نفوذپذیری هوا است که موجب عدم تأثیرگذاری بر اندوکتانس، اشباع‌شدگی و جریان‌های گردابی می‌شود و سبب می‌شود حسگر رفتار خطی خود را حفظ کند. لازم به ذکر است تعداد دور سیم‌پیچ به شدت در تعیین حساسیت و پهنای باند کاری حسگر نیز تأثیرگذار است [۳]. حسگر روگوفسکی یک سیگنال ولتاژ $V_{RC} = \mu A \frac{N}{l} \frac{dI}{dt}$ تولید می‌کند. که با در نظر گرفتن این تعداد دور، ولتاژ خروجی حسگر از بهره بالایی برخوردار است [۴]. لذا سیگنال خروجی به راحتی از نوفه تفکیک خواهد شد. ضخامت



سیم مورد استفاده ۰/۲۰mm معادل ۳۲AGW^۱ است. این سیم به طور فشرده، یکنواخت و بدون شکاف حول فرم‌دهنده پیچیده شده است، این امر جریان نشتی را به حداقل می‌رساند. به منظور آن‌که حسگر محافظه خلأ را پوشش دهد و دو انتهای آن، بدون شکاف هم‌ردیف شوند؛ مجموع شعاع محافظه خلأ توکامک و شعاع داخلی حسگر روگوفسکی لحاظ شد و فرم‌دهنده‌ای به شعاع ۱۳/۱۵cm در نظر گرفته شد. حلقه‌ی برگشت نیز در طول محور فرم‌دهنده و در خلاف جهت، از مرکز حسگر عبور داده شد. در نهایت این حسگر با یک لایه کابل شرینگ نسبت به محیط عایق شد. پارامترهای حسگر روگوفسکی ساخته شده برای توکامک الوند در جدول (۱) لیست شده‌اند. سیگنال اندازه‌گیری شده قبل از اتصال به سیستم دریافت داده توسط یک انتگرال‌گیر اکتیو انتگرال‌گیری خواهد شد و سپس از طریق یک کابل هم‌محور RG58U به اتاق کنترل انتقال داده می‌شود.

جدول (۱): پارامترهای حسگر روگوفسکی ساخته شده برای توکامک الوند

۱۳/۱۵	شعاع اصلی b(cm)	I_p	جریان مورد اندازه‌گیری
۰/۵۵	شعاع داخلی پیچه a(cm)	۷۲/۴۲	مقاومت R(Ω)
۰/۲۵	ضریب کالیبراسیون kA/V	۱/۷۰۲	اندوکتانس L(mH)

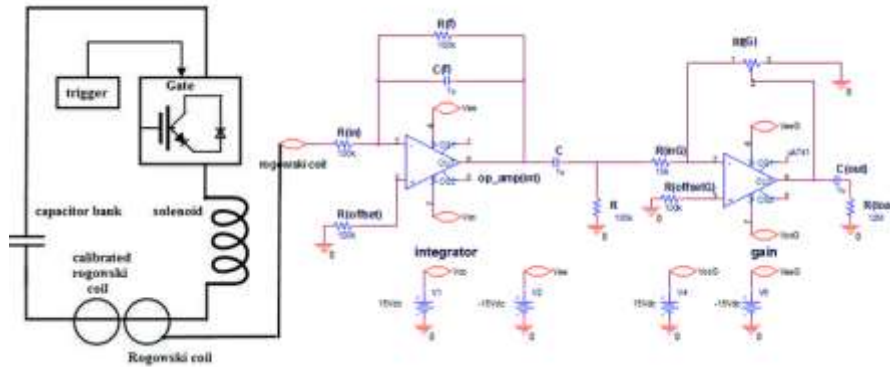
طراحی و ساخت انتگرال‌گیر: شماتیک مدار انتگرال‌گیر در شکل (۲) قابل مشاهده است. ثابت زمانی این انتگرال‌گیر اکتیو، ده برابر زمان مشاهده سیگنال لحاظ شده است. با اتصال ورودی به پایه‌ی دو تقویت‌کننده عملیاتی اتصال معکوس را خواهیم داشت که در این حالت ورودی و خروجی اختلاف‌فاز دارند و نسبت آن معادل با $\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_f}{R_{in}(1+R_f C_f S)}$ است. مقاومت R_f موازی با خازن C_f ، مسیری برای دشارژ خازن در مدت زمانی که مدار کار نمی‌کند به وجود می‌آورد، لذا با شروع مجدد کار شارژ خازن صفر بوده و انتگرال‌گیر به اشباع نمی‌رود. برای از بین بردن آفست، مقاومت بزرگی از پایه‌ی مثبت تقویت‌کننده زمین می‌گردد. سوئیچی برای دشارژ بار الکتریکی باقی مانده در خازن C_f پس از هر مرتبه اندازه‌گیری جریان پلاسما در نظر گرفته شده است. در نتیجه خطای تجمع سیگنال در شات‌های متوالی از بین خواهد رفت. این انتگرال‌گیر به گونه‌ای طراحی شده است که پاسخ مناسبی به فرکانس پایین داشته باشد. به عبارت دیگر مانند یک فیلتر پایین‌گذر عمل می‌کند تا شکل موج جریان پلاسما را به درستی نشان دهد.

کالیبراسیون حسگر روگوفسکی: قبل از نصب حسگر روگوفسکی بر روی توکامک الوند این حسگر در مقایسه با یک حسگر روگوفسکی تجاری ساخت شرکت پیرسون الکترونیک^۲ در یک مدار شبیه‌ساز توکامک، کالیبره شده و دقت آن حدود ۱۰٪ تخمین زده شده است. برای این منظور مداری RLC که شبیه‌ساز پلاسما توکامک است (مطابق با شکل (۳)) طراحی شده است. با تخلیه بانک خازنی در سولنوئید با ابعاد مشخص، یک میدان

^۱ American wire gauge

^۲ Pearson electronic rogowski coil

پالسی مشابه با توکامک ایجاد خواهد شد. جریانی که توسط بانک خازنی و سوئیچ IGBT ایجاد می‌گردد توسط حسگر روگوفسکی پیرسون و روگوفسکی ساخته شده، مقایسه می‌شود.



شکل (۲): مدار طراحی شده شبیه‌ساز پلاسمای توکامک به همراه مدار انتگرال‌گیر به منظور محاسبه ضریب کالیبراسیون مشخصات حسگر روگوفسکی پیرسون الکترونیک مورد استفاده مطابق جدول (۲) است.

جدول (۲): مشخصات حسگر روگوفسکی پیرسون الکترونیک

فرکانس قطع پایین	فرکانس قطع بالا	اتصال خروجی	دمای عملیاتی	حساسیت	وزن	مقاومت	بیش‌ترین جریان مورد اندازه‌گیری
۱ Hz	۲۰ MHz	BNC	۰ تا ۶۵°C	۰/۱ V/A	۲۲ اونس	۵۰ Ω	۵۰۰۰ A

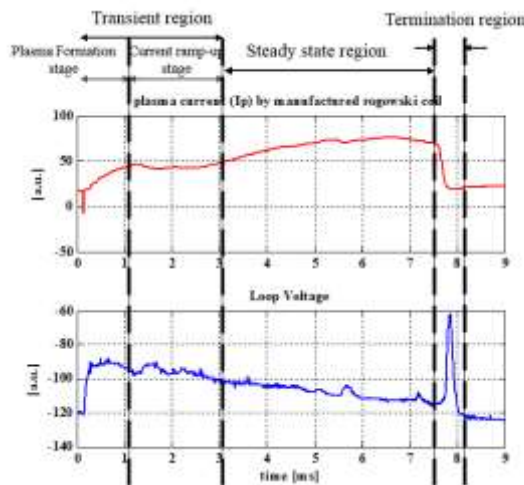
نتایج و بحث

در شکل (۳)، حسگر روگوفسکی ساخته شده و محل نصب آن حول محفظه توکامک نشان داده شده است. توکامک الوند پس از آماده‌سازی خلا و تمیز نمودن محفظه سیستم توکامک، آزمایش‌هایی با هدف تست حسگر روگوفسکی تحت شرایط عملیاتی مشخص انجام شد. به‌عنوان نمونه در آزمایش تجربی شماره OC111712: میزان میدان چنبره‌ای ۱۸۵۰ ولت، میزان ولتاژهای عمودی سریع ۱۸۰۰ ولت، ولتاژهای عمودی کند ۱۴۰۰ ولت، گرمایش اهمی سریع و کند به ترتیب ۳۸۰۰ و ۲۲۰۰ ولت، خلا سیستم 4×10^{-5} torr و میزان ولتاژ پیش‌یونش ۲/۵ کیلوولت می‌باشد و نتیجه آزمایش زمان پلازما برابر با ۸/۵ میلی ثانیه اندازه‌گیری شد [۵].



شکل (۳): حسگر روگوفسکی ساخته شده و نصب آن بر روی توکامک الوند

سیر تکامل مراحل تخلیه توکامک الوند در شکل (۴) قابل مشاهده است، جریان گرمایش اهمی (I_{OH}) ولتاژی را در توکامک القا می‌کند، به موجب آن گاز هیدروژن پرکننده محفظه خلا سبب تشکیل پلازما می‌شود و پلاسمای حاصل جریان پلاسمای القایی (I_p) را حمل می‌کند. لذا مرحله‌ی اول تخلیه را مرحله‌ی تشکیل پلازما می‌نامند. افت ناگهانی در حلقه ولتاژ، مطابق با افت مقاومت پلازما است هنگامی که پلازما به طور کامل یونیزه می‌شود، در این حالت جریان پلازما تا حداکثر مقدار ممکن افزایش می‌یابد لذا این مرحله به عنوان مرحله‌ی پیمایش جریان شناخته می‌شود. مراحل شکل‌گیری پلازما و پیمایش جریان در مجموع ناحیه حالت گذرا نامیده می‌شود. مراحل تکامل تخلیه را می‌توان به سه بخش تقسیم نمود: ناحیه اول، حالت گذرا متشکل از مراحل شکل‌گیری پلازما و پیمایش جریان، که به آن پرداخته شد. به دنبال حالت گذرا، ناحیه‌ی حالت ماندگار را خواهیم داشت که به‌طور نسبی جریان پلازما در این ناحیه ثابت است و ولتاژ حلقه، مقدار کمی دارد. ناحیه نهایی تخلیه نیز ناحیه خاتمه است که پس از آن پلازما از دست خواهد رفت.



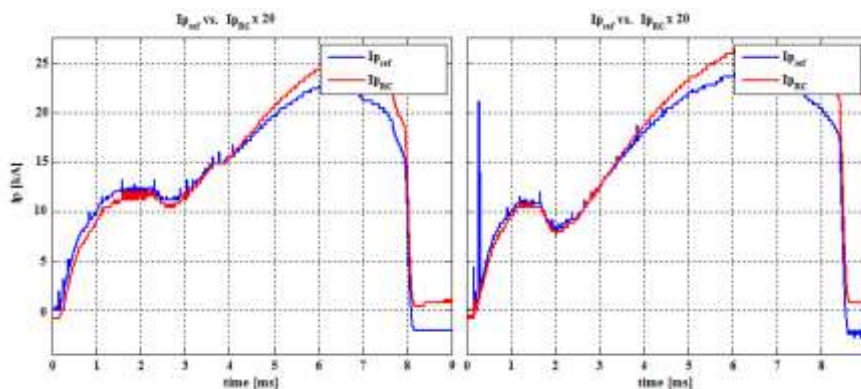
شکل (۴): سیر تکامل تخلیه توکامک الوند در مد عادی

همچنین سیگنال توزیع جریان حسگر روگوفسکی ساخته‌شده و حسگر روگوفسکی کالیبره مرجع پس از نصب بر روی توکامک الوند در شکل (۵) در دو شات متوالی در شرایط آزمایش یکسان، آورده شده است. حسگر روگوفسکی ساخته‌شده از بهره بالایی برخوردار است به‌طوری‌که ۴ برابر حسگر مرجع، سیگنال را تقویت خواهد کرد؛ لذا دامنه سیگنال خروجی حسگر ساخته‌شده در اتاق کنترل کاهش داده شد و نمودارهای زیر حاصل شد. در این نمودار بیان‌گر سیگنال توزیع جریان پلاسمای توکامک، اندازه‌گیری شده توسط حسگر ساخته شده و $I_{p_{RC}}$ سیگنال توزیع جریان پلاسمای توکامک، اندازه‌گیری شده توسط حسگر مرجع است. همان‌طور که قابل ملاحظه است جریان پلاسمای توکامک الوند حدود ۳۰ kA اندازه‌گیری شده است.



نتیجه‌گیری و فعالیت‌های آینده

نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده، نشان از صحت عملکرد حسگر روگوفسکی ساخته‌شده دارد و این حسگر به خوبی قادر است جریان پلاسما را اندازه‌گیری کند. در ادامه با استفاده از جریان پلاسما و ولتاژ حلقه و همچنین مدار معادل توکامک الوند، به محاسبه‌ی مقاومت اهمی و القائیدگی پلاسما می‌پردازیم. سپس تعادل چگالی توان با استفاده از مدل 0-D در این توکامک بررسی می‌شود و پروفایل چگالی توان، از جمله چگالی توان گرمایش اهمی به دست خواهد آمد.



شکل (۵): سیگنال توزیع جریان پلاسما حاصل از حسگر روگوفسکی ساخته‌شده و روگوفسکی مرجع

همچنین با تقریبی مناسب و با استفاده از مقاومت اسپایترز^۱ توکامک الوند، از طریق رابطه $T_e^{3/2} = 5 \times$ می‌توان دمای الکترونی را مورد ارزیابی مجدد و پس از پایستگی چگالی الکترون و ذرات خشی را مورد بحث قرار داد [۶]. همچنین در آینده در این پژوهش از این حسگر در سایر زمینه‌های کنترلی مانند اندازه‌گیری جریان ادی^۲ اندازه‌گیری جریان هالو^۳ و تشخیص پلاسما استفاده خواهد شد [۳].

مراجع:

- [1] B. McCormack et. al, "Rogowski loop designs for NSTX" *Fusion Eng.*, p. pp. 306–309, in Proc. 18th Symp. Oct. 25–29, 1999.
- [2] C. Qing et. al, "Design and characteristics of two Rogowski coils based on printed circuit board" *IEEE Trans. Instrument. Measure.*, vol. 55, no. 3, vol. 55, p. pp. 939–943, June 2010.
- [3] J. E. Morelli, "Plasma position control in the STOR-M TOKAMAK: a fuzzy logic approach" Ph.D. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatchewan, 2003.
- [4] P. W. Zhang, "Improved Ohmic Confinement Induced by Turbulent Heating and Electrode Biasing in the STOR-M Toakamak" Ph.D. Thesis, University of Saskatchewan, may 1993.
- [5] "دفتر ثبت اطلاعات آزمایشگاهی توکامک الوند" [۳].

^۱ Spritzer resistance
^۲ eddy current
^۳ Halo current



- [6] S. Wolfe, "The STOR-M Tokamak: Experiments on Current Reversal and Fast Current Ramping" University of Saskatchewan, July, 1988.