

مدل سازی و طراحی سیستم کنترل مقاوم جریان پلاسما در توکامک دماوند

حسن زندی^۱، معصومه فتاحی^۱، بیژن معاونی^{۱*}، حسین رسولی^۲

۱. گروه مهندسی سیستم و کنترل، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، صندوق پستی: ۱۳۵۵-۱۶۳۱۵، تهران - ایران

۲. پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۵۱۱۱۳-۱۴۳۹۹، تهران - ایران

*Email: b.moaveni@kntu.ac.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۳/۳۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۶/۲

چکیده

در این مقاله با بهره‌گیری از توابع انرژی و روش هامیلتون- لاگرانژ، مدلی از دینامیک جریان پلاسما و معادلات دینامیکی مابین آن با جریان سیم‌پیچ‌های فعال در توکامک دماوند استخراج شده است. در فرایند محاسبه پارامترهای مدل دینامیک جریان پلاسما، از محاسبات تحلیلی بر پایه قوانین فیزیکی و هم‌چنین روش‌های تخمین پارامتر مبتنی بر مدل جعبه خاکستری استفاده شده است. از داده‌های سه شات تجربی توکامک دماوند در حضور پلاسما به‌منظور تخمین پارامتر نامشخص مدل و هم‌چنین صحت‌گذاری استفاده شده است. نتایج مدل‌سازی جریان پلاسما بیان‌گر مدل دینامیکی با پارامترهای متغیر به‌صورت تابعی از شرایط و موقعیت مکانی پلاسما است. در این مقاله، بر اساس مدل‌سازی صورت گرفته، یک کنترل‌کننده مقاوم تناسبی- انتگرالی به‌منظور کنترل جریان پلاسما با استفاده از مقدار جریان سیم‌پیچ‌های مرکزی و تعادلی و نحوه تأثیرگذاری آن‌ها طراحی شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی بیان‌گر عملکرد قابل قبول سیستم کنترل طراحی شده است.

کلیدواژه‌ها: توکامک دماوند، دینامیک جریان پلاسما، روش هامیلتون- لاگرانژ، مدل جعبه خاکستری، کنترل‌کننده مقاوم

Modeling and robust control system design for plasma current in damavand tokamak

H. Zandi¹, M. Fatahi¹, B. Moaveni^{1*}, H. Rasouli²

1. Department of Systems and Control, Faculty of Electrical Engineering, K.N. Toosi University of Technology (KNTU), P.O.Box: 1355-16315, Tehran, Iran

2. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.BOX:14399-51113, Tehran, Iran

Research Article

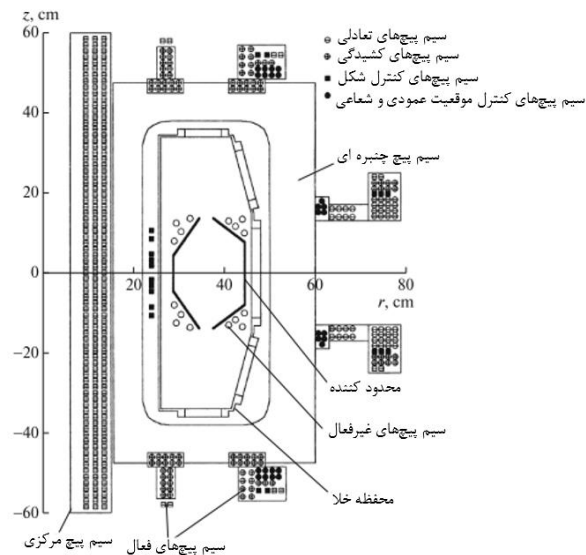
Received 19.6.2020, Accepted 23.8.2020

Abstract

In the present work, a dynamic model of plasma current and its relation with the currents of active coils is derived using the Hamilton-Lagrange and energy functions. Model parameters of the plasma current are calculated using the analytical approach and the parameter estimation methods. The parameter estimation is performed based on the gray-box model. The experimental data of three shots in the presence of plasma in Damavand Tokamak have been used to estimate the parameters of the model. The results of plasma current modeling show a dynamic model with variable parameters as a function of plasma conditions and plasma position. In the present work, based on the obtained dynamical model, a robust PI controller has been designed to control the plasma current using the currents of the central solenoid and equilibrium coil. The simulation results using real experimental data indicate the acceptable performance of the designed control system.

Keywords: Damavand tokamak, Plasma current dynamic, Hamilton-lagrange method, Gray-box model, Robust controller





شکل ۱. سطح مقطع محفظه خلأ و نحوه قرار گرفتن سیم‌پیچ‌های فعال در توکامک دماوند [۲].

در مرجع [۹] یک مدل خطی برای معادلات جریان ارایه شده و با در نظر گرفتن ورودی مرجع مناسب برای جریان، یک کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی همراه با بلوک ضد اشباع^۴ برای این سیستم طراحی شده است. در مرجع [۱۰] با بهره‌گیری از مدل خطی و با استفاده از روش‌های کنترل چندمتغیره مقاوم مبتنی بر H_∞ ، کنترل جریان و شکل پلاسما صورت گرفته است. در مرجع [۴] یک کنترل‌کننده مقاوم H_∞ برای توکامک TCV با استفاده از مدل خطی RZIP مورد استفاده قرار گرفته است که ایده طراحی آن بر اساس عملکرد نامی و پایداری مقاوم است. در مرجع [۱۱] با بهره‌گیری از مدل خطی RZIP به طراحی یک کنترل‌کننده دینامیکی سلسله مراتبی پرداخته شده که این حلقه کنترلی بر اساس یک الگوریتم کنترل جریان مدل پیش‌بین^۵ در یک ساختار چندگانه است.

در پژوهش حاضر، با بهره‌گیری از معادلات هامیلتون-لاگرانژ و هم‌چنین دینامیک غیرخطی جریان پلاسما و لزوم لحاظ نمودن این رفتار در طراحی کنترل‌کننده، مدل دینامیکی خطی‌سازی شده‌ای در حضور نامعینی‌های پارامتری مدل استخراج شده است. ورودی‌های این مدل مشتق جریان سیم‌پیچ‌های فعال (I_p) و خروجی آن جریان پلاسما می‌باشد. در مدل ارایه شده با استفاده از جریان تخمین زده شده برای رشته‌های پلاسما، پارامترهای خودالقای پلاسما (L_p) و القای متقابل بین پلاسما و سیم‌پیچ‌های فعال (M_{ps}) به صورت تحلیلی و مقاومت پلاسما به کمک روش‌های تخمین پارامتر

۱. مقدمه

توکامک^۱ ماشین چنبره‌ای است که از میدان‌های مغناطیسی جهت تولید و محصورسازی پلاسما گرم استفاده می‌کند [۱]. در شکل ۱ مجموعه شش سیم‌پیچ فعال توکامک دماوند نشان داده شده است.

در مدت زمان تخلیه انرژی الکتریکی در توکامک، مسئله ردیابی ورودی مرجع توسط جریان پلاسما (I_p) یکی از اصولی است که باید توسط سیستم کنترل انجام شود. در توکامک‌ها به منظور القای جریان پلاسما از سیم‌پیچ مرکزی و خاصیت ترانسفورماتوری آن استفاده می‌شود. سیم‌پیچ مرکزی، تأثیر قابل توجهی را در تولید و کنترل جریان پلاسما برعهده داشته و در کنار آن، سیم‌پیچ تعادلی نیز بر جریان پلاسما تأثیرگذار می‌باشد. مقاوم بودن سیستم کنترل در مقابل نامعینی‌های پارامتری مدل، تغییرات نقطه کار و یا شرایط بهره‌برداری از توکامک یک نیاز کلیدی برای کنترل جریان پلاسما است.

دو روش CREATE-L و RZIP عمده‌ترین روش‌های مدل‌سازی تحلیلی پلاسما به‌شمار می‌روند [۱]. در فرایند مدل‌سازی جریان پلاسما بر اساس روش CREATE-L، از مدل خطی‌سازی شده حول نقطه تعادل استفاده شده است؛ از جمله نقاط ضعف مدل CREATE-L این است که اغتشاش‌های با دینامیک سریع را در نظر نگرفته و در مدل لحاظ نمی‌شود [۲]. مدل RZIP دارای سه درجه آزادی جریان، موقعیت شعاعی و عمودی پلاسما بوده و به‌عنوان یک مدل پارامتر توده‌ای^۲ معرفی می‌شود که با بهره‌گیری از روش هامیلتون-لاگرانژ به دست می‌آید. به‌منظور طراحی کنترل‌کننده مبتنی بر مدل، مدل ارایه شده می‌تواند در هر وضعیت تعادلی، خطی شود [۴]. از جمله نقاط ضعف روش RZIP ناکارآمدی آن در مدل‌سازی پلاسمایی است که سطح‌مقطع آن بسیار مثلثی شکل^۳ است [۵]. با این حال با استفاده از روش مدل‌سازی پارامتری می‌توان تأثیر متغیر بودن شکل پلاسما را ناچیز در نظر گرفت [۶]. مدل ارایه شده در RZIP به‌طور کامل اثرات مقاومت پلاسما (Ω_p) را در نظر می‌گیرد. مدل تعمیم‌یافته RZIP در برابر پاسخ حلقه باز در توکامک JT-۶۰U [۶] و توکامک TCV [۷] اعتبارسنجی شده است. در توکامک EAST به‌منظور کاهش پیچیدگی سیستم کنترل، مدل RZIP ارایه شده برای پلاسما تنها دارای دو درجه آزادی است [۸].

1. Toroidalnaya Kamera i Magnitnaya Katushka (TOKAMAK)
2. Lumped-Parameter Model
3. Triangularity

4. Anti Wind-Up
5. MPC



$$\dot{I}_p = -\frac{\Omega_p^0}{L_p} I_p - \frac{M_{p,cs}^0}{L_p} \dot{I}_i - \frac{M_{p,r}^0}{L_p} \dot{I}_r - \left[\begin{array}{c} \dot{I}_k \\ \dot{I}_{ck} \\ \dot{I}_{cz} \\ \dot{I}_{cr} \end{array} \right] - \frac{1}{L_p} \left(\frac{\partial M_{ps}}{\partial R} \Big|_0 \frac{I_s^0}{I_p^0} + \frac{\partial L_p}{\partial R} \Big|_0 + \mu_0 \pi \frac{S}{l^v} \beta_p \right) \dot{R} I_p^0 \quad (2)$$

که در آن

$$L_p = \left(L_p^0 + \mu_0 \pi \frac{S}{l^v} \beta_p R^0 \right) \quad (3)$$

رابطه ۲ نشان‌دهنده نحوه اثرگذاری جریان سیم‌پیچ‌های فعال بر جریان پلاسما است. با توجه به ویژگی‌های پلاسما، دو جریان سیم‌پیچ مرکزی (I_i) و سیم‌پیچ تعادلی (I_r) نقش اساسی در تولید پلاسما و کنترل جریان آن داشته و جریان‌های کشیدگی (I_k)، کنترل موقعیت شعاعی (I_{cr})، کنترل موقعیت عمودی (I_{cz}) و کنترل شکل (I_{ck}) چندان مؤثر نیستند. این جریان‌ها را می‌توان به‌صورت ورودی‌های ناخواسته (اغتشاشی) در نظر گرفت، هم‌چنین جمله

$$\left(\frac{\partial M_{ps}}{\partial R} \Big|_0 \frac{I_s^0}{I_p^0} + \frac{\partial L_p}{\partial R} \Big|_0 + \mu_0 \pi \frac{S}{l^v} \beta_p \right) \dot{R} I_p^0$$

به‌عنوان اغتشاش از نوع فرایند در مدل جریان پلاسما در نظر گرفته می‌شود. رابطه ۲ را می‌توان به فرم استاندارد به‌صورت رابطه ۴ بازنویسی نمود. در رابطه ۴، $d_u(t)$ به‌عنوان اغتشاش ورودی و $d_p(t)$ به‌عنوان اغتشاش فرایند در نظر گرفته شده و در مدل کامل پلاسما به‌عنوان تداخل بین موقعیت پلاسما و جریان پلاسما محسوب می‌گردد.

$$\dot{I}_p(t) = a I_p(t) - b_i \dot{I}_i(t) - b_r \dot{I}_r(t) + d_u(t) + d_p(t) \quad (1-4)$$

که در آن

$$d_u(t) = - \left[\begin{array}{cccc} b_k & b_{ck} & b_{cz} & b_{cr} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \dot{I}_k \\ \dot{I}_{ck} \\ \dot{I}_{cz} \\ \dot{I}_{cr} \end{bmatrix}$$

$$d_p(t) = -Y \dot{R} I_p^0$$

$$Y = \frac{1}{L_p} \left(\frac{\partial M_{ps}}{\partial R} \Big|_0 \frac{I_s^0}{I_p^0} + \frac{\partial L_p}{\partial R} \Big|_0 + \mu_0 \pi \frac{S}{l^v} \beta_p \right)$$

محاسبه می‌شوند. بنای قطبی (β_p) نیز یکی از متغیرهای مدل دینامیکی جریان است که رابطه آن با جریان پلاسما با استفاده از نتایج حاصل از پژوهش‌های پیشین به‌صورت یک رابطه خطی تقریب زده و ارایه شده است. سپس نتایج ارزیابی و صحت‌گذاری مدل به دست آمده در حالت حلقه باز با استفاده از داده‌های تجربی توکامک دماوند نشان داده می‌شود. در ادامه با بهره‌گیری از قضیه خاریتانوف^۱ یک کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی مقاوم به‌منظور ردیابی مقدار مطلوب جریان پلاسما طراحی شده است. در بخش انتهایی این مقاله، نتایج شبیه‌سازی کنترل‌کننده ارایه شده است.

۲. مدل‌سازی دینامیک جریان پلاسما

در این بخش، یک مدل دینامیکی از جریان پلاسما در توکامک دماوند با استفاده از توابع انرژی مبتنی بر روش هامیلتون-لاگرانژ ارایه می‌شود. در ادامه ابتدا مدل دینامیکی ارایه شده و پس از آن با ارایه فرضیات مناسب، مدل در حد امکان ساده شده و نشان داده خواهد شد که حول نقاط کاری مختلف، خطی‌سازی به چه نحوی انجام می‌شود.

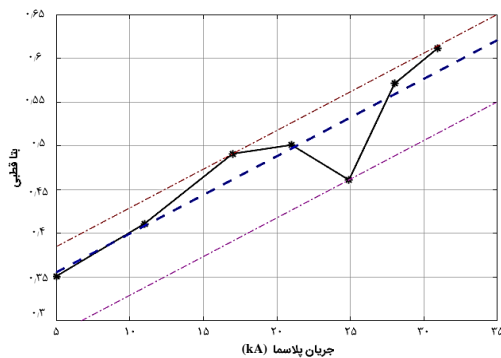
در مرجع [۴] مدل دینامیکی برای جریان پلاسما ارایه شده است؛ این مدل به‌صورت یک مدل جابه‌جایی پلاسمای صلب، که در آن پلاسما به‌صورت یک واحد که مجاز به حرکت به‌صورت عمودی یا شعاعی است، در نظر گرفته می‌شود. معادله مداری پلاسما به‌صورت رابطه ۱ می‌باشد.

$$\frac{d(M_{sp} I_s)}{dt} + \frac{d(L_p I_p)}{dt} + \Omega_p I_p + \frac{d\left(\mu_0 \pi \frac{S}{l^v} \beta_p R I_p\right)}{dt} = 0 \quad (1)$$

در رابطه ۱، نکته جالب توجه متغیر بودن مقادیر خودالقایی پلاسما، القای متقابل بین پلاسما و جریان سیم‌پیچ‌های فعال، جریان سیم‌پیچ‌های فعال و جریان پلاسما است. به‌منظور ساده‌تر شدن مدل دینامیک جریان پلاسما از خطی‌سازی مدل مداری پلاسما حول نقطه کار ($I_p^0, R I_p^0, I_s^0$) استفاده می‌شود. واضح است که هر نقطه‌ای داخل محدودکننده^۲ توکامک می‌تواند به‌عنوان یک نقطه کار برای موقعیت عمودی و شعاعی پلاسما در نظر گرفته شود. با فرض شعاعی بودن میدان مغناطیسی در حالت تعادل و نیز با توجه به این‌که تغییرات موقعیت عمودی تأثیری بر مقدار ضریب خودالقایی پلاسما ندارد، معادله دینامیکی خطی حاکم بر جریان پلاسما و جریان سیم‌پیچ‌ها به‌صورت رابطه ۲ قابل بازنویسی است [۴]:

1. Kharitonov Theorem
2. Limiter





شکل ۲. رابطه β_p با جریان پلاسما. نمودار خط-چین به رنگ آبی در شکل خط برازش شده به β_p است، خطوط نشان داده شده با خط نقطه نیز حد بالا و پایین تغییرات خط برازش شده را نشان می‌دهد.

۴.۲ محاسبه موقعیت شعاعی مرکز پلاسما در نقطه کار همان‌گونه که از رابطه‌های ۲ تا ۴ مشخص است، در مدل‌سازی جریان پلاسما به موقعیت شعاعی مرکز پلاسما در نقطه کار (R^0) نیاز است. موقعیت شعاعی پلاسما با بهره‌گیری از رابطه ۷ و با در دست داشتن مقدار تخمینی جریان رشته‌های پلاسما^۱ به دست می‌آید. مشخص است که تغییر مقدار جریان پلاسما در طول شات، موجب تغییر موقعیت شعاعی مرکز پلاسما (R) خواهد شد [۱].

$$R^0 = \frac{1}{I_p} \sum_{i=1}^f R_{pi} \times I_{pi} \quad (7)$$

۵.۲ تخمین مقاومت پلاسما

با توجه به مشخص بودن مدل دینامیکی حاکم بر جریان پلاسما، فرایند تخمین مقاومت پلاسما بر اساس یک مدل جعبه خاکستری^۲ صورت گرفته است. بدین صورت که در سمت راست رابطه ۴، ضرایب جریان سیم‌پیچ‌های مرکزی و تعادلی از روابط تحلیلی و ضریب جریان پلاسما از طریق روش‌های شناسایی سیستم تعیین شده‌اند. با توجه به رابطه ۴، پارامتر a به مقدار مقاومت پلاسما وابسته است. مقدار مقاومت پلاسما دارای رابطه معکوس با مقدار دما و سطح مقطع پلاسما است [۱۶، ۱۷]. رابطه ذکر شده در مراجع [۱۶، ۱۷] به دلیل وجود پارامترهایی که در توکامک دماوند نامشخص بوده و به‌سادگی قابل محاسبه و یا اندازه‌گیری نیستند، غیرقابل استفاده می‌باشد. با توجه به مشخص بودن مدل دینامیکی به‌صورت رابطه ۴ و همچنین محاسبه پارامترهای b_i ، b_r که از روابط تحلیلی مدل به دست می‌آیند، جهت محاسبه پارامتر a از روش تخمین کم‌ترین مربعات استفاده می‌شود. در این روش کافی است که تابع همواره مثبت مجموع مربعات خطای تخمین به‌صورت رابطه ۸ کمینه شود. البته لازم به ذکر است که به‌منظور تخمین صحیح پارامتر a ، سناریوهای داده‌برداری به‌نحوی تنظیم شده‌اند که مقدار سیگنال‌های اغتشاش، در این سناریوها برابر صفر باشد.

$$a = -\frac{\Omega_p^0}{L_p}, b_i = \frac{M_{p,cs}^0}{L_p}, b_r = \frac{M_{p,r}^0}{L_p}, b_k = \frac{M_{p,k}^0}{L_p}$$

$$b_{ck} = \frac{M_{p,ck}^0}{L_p}, b_{cz} = \frac{M_{p,cz}^0}{L_p}, b_{cr} = \frac{M_{p,cr}^0}{L_p} \quad (2-4)$$

پارامترهای معادله ۴ وابسته به مقدار خودالقایی پلاسما، القای متقابل پلاسما و سیم‌پیچ‌های فعال و همچنین مقدار مقاومت پلاسما است.

۱.۲ محاسبه القای متقابل رشته‌های پلاسما، سیم‌پیچ مرکزی و سیم‌پیچ تعادلی

به‌منظور محاسبه $M_{p,r}^0$ و $M_{p,cs}^0$ ، لازم است القای متقابل بین تک‌تک رشته‌های جریان پلاسما و تک‌تک حلقه‌های سیم‌پیچ مرکزی و سیم‌پیچ تعادلی به‌ترتیب محاسبه گردد [۱۲]. به این منظور جریان پلاسما با تعداد شش رشته جریان مدل‌سازی شده است که محل این شش رشته و مقدار جریان هر یک از این رشته‌ها با استفاده از الگوریتم‌های تخمین شکل پلاسما محاسبه می‌شوند [۲، ۱۳، ۱۴].

۲.۲ محاسبه ضریب خود القای پلاسما

برای محاسبه ضریب خودالقایی پلاسما (L_p) در رابطه ۴، به مقدار L_p^0 نیاز است. مقدار L_p^0 برای هر رشته جریان پلاسما از رابطه ۵ قابل محاسبه است [۱۳]:

$$L_p^0 = \mu_0 R \left[\ln \left(\frac{\lambda R}{r} \right) - \frac{\gamma}{4} \right] \quad (5)$$

که در آن، R شعاع اصلی پلاسما، r شعاع فرعی پلاسما و $R \gg r$ است.

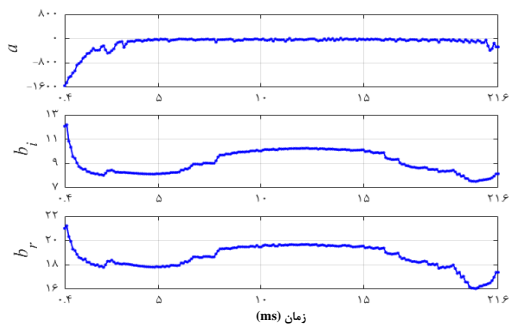
۳.۲ محاسبه بنای قطبی

در محاسبه پارامتر L_p به مقدار β_p نیز نیاز است. در مرجع [۱۵] نشان داده شده است که ارتباط مقدار β_p با جریان پلاسما (I_p) دارای نموداری به‌صورت شکل ۳ است. رابطه ۶ ارتباط جریان پلاسما و β_p را با توجه به شکل ۲ نشان می‌دهد.

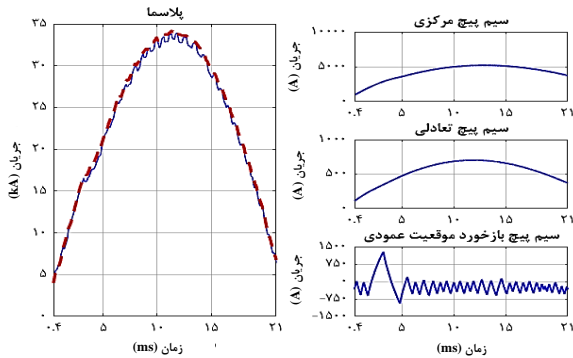
$$\beta_p = 10^{-3} \times (I_p - 5000) + 0.35 + \delta, \quad |\delta| \leq 0.0704 \quad (6)$$

1. Plasma Filaments
2. Gray Box

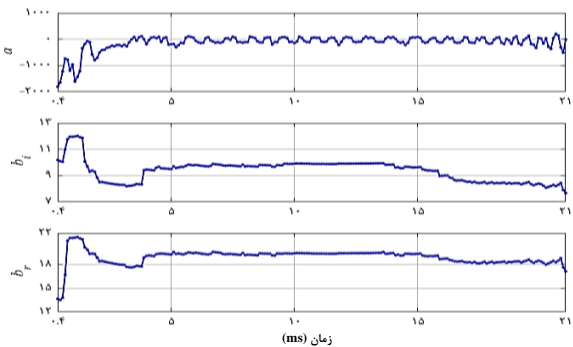




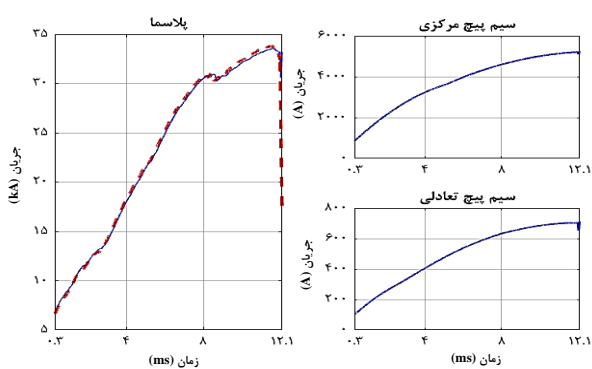
شکل ۴. تغییرات پارامترهای مدل جریان پلاسما بر اساس داده‌های شات ۶.



شکل ۵. سمت چپ- جریان پلاسمای اندازه‌گیری شده شات ۴۰ در حضور ورودی‌های اغتشاشی (خط- نقطه قرمز) و جریان پلاسمای شبیه‌سازی شده (خط توپر آبی). سمت راست- ورودی‌های جریان واقعی مدل و ورودی اغتشاشی وارده به سیستم.



شکل ۶. تغییرات پارامترهای مدل جریان پلاسما بر اساس داده‌های شات ۴۰.



شکل ۷. سمت چپ- جریان پلاسمای اندازه‌گیری شده شات ۱۰ (خط- نقطه قرمز) و جریان پلاسمای شبیه‌سازی شده (خط توپر آبی). سمت راست- ورودی‌های جریان واقعی مدل.

$$E = \sum_{j=1}^N [Y(j) - \hat{a}U(j)]^T$$

$$Y = \dot{I}_p + b_i \dot{I}_i + b_r \dot{I}_r, U = I_p \quad (8)$$

با توجه به رابطه ۸، روابط کلی مربوط به تخمین کم‌ترین مربعات به صورت رابطه ۹ قابل بازنویسی است:

$$E = [Y - \hat{a}U]^T [Y - \hat{a}U]$$

$$\frac{\partial E}{\partial \hat{a}} = 0 \rightarrow \hat{a} = (U^T U)^{-1} U^T Y \quad (9)$$

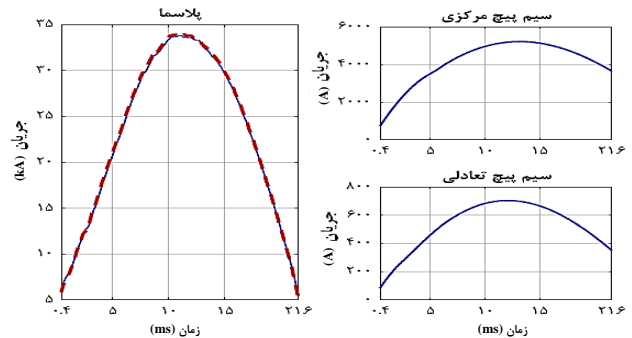
که در آن \hat{a} تخمینی از پارامتر a است و با کمینه کردن این خطا، می‌توان مقدار تخمینی این پارامتر را محاسبه نمود.

۶.۲ شبیه‌سازی و صحت‌گذاری نتایج مدل

در این بخش نتایج مدل‌سازی مورد ارزیابی و صحت‌گذاری قرار گرفته است. بر اساس رابطه‌های ۲ تا ۴ و روند ارایه شده در بخش‌های پیشین، نتایج شبیه‌سازی برای سه شات زیر به ترتیب در شکل‌های ۳، ۵ و ۷ نشان داده شده است.

- شات ۶: فاقد هر نوع کنترل
- شات ۴۰: تحت کنترل موقعیت عمودی
- شات ۱۰: گسیختگی پلاسما (فاقد هرگونه کنترل)

تغییرات مقادیر سه پارامتر مدل دینامیک جریان پلاسما مطابق با رابطه ۴ برای سه دسته داده تجربی در شکل‌های ۴، ۶ و ۸ نشان داده شده است. تغییرات این پارامترها در طول آزمایش نشان‌دهنده دینامیک متغیر با زمان پلاسما است. نکته جالب توجه در روند محاسبه پارامترهای اصلی مدل این است که پارامترهای مدل در بازه میانی داده‌برداری از حدود ۸ تا ۱۶ ms دچار تغییرات کم‌تری خواهند شد و بیش‌تر تغییرات به زمان تشکیل و رشد پلاسما و هم‌چنین زمان سرد شدن آن مربوط می‌شوند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که دینامیک جریان پلاسما با دقت قابل‌قبولی، توانسته جریان اندازه‌گیری شده را ردیابی کند. بر اساس شبیه‌سازی‌های صورت گرفته از دینامیک جریان پلاسما و برای شات‌های مختلف، بازه تغییرات مقادیر پارامترهای رابطه (۴-۲) در جدول ۱ ذکر شده است.



شکل ۸. سمت چپ- جریان پلاسمای اندازه‌گیری شده شات ۶ (خط- نقطه قرمز) و جریان پلاسمای شبیه‌سازی شده (خط توپر آبی). سمت راست- ورودی‌های جریان واقعی مدل.



در ادامه یک کنترل کننده تناسبی- انتگرالی مقاوم مبتنی بر قضیه پایداری خاریتانوف پیشنهاد می گردد.

۱.۳ قضیه پایداری خاریتانوف

قضیه خاریتانوف به بررسی پایداری سیستم‌های نامعین خطی از طریق بررسی پایداری چهار چند جمله‌ای خاص مرتبط با معادله مشخصه، معروف به چند جمله‌ای‌های خاریتانوف، می پردازد. اگر معادله مشخصه سیستم نامعین به صورت رابطه ۱۲ باشد که ضرایب آن در محدوده مشخصی می‌توانند تغییر کنند، کل سیستم پایدار است اگر و فقط اگر چهار چند جمله‌ای خاریتانوف رابطه ۱۳ هرویتز^۱ باشند [۱۸].

$$P(s) = \sum_{i=0}^n d_i s^i, \quad d_i^- \leq d_i \leq d_i^+ \quad (12)$$

$$p_1(s) = d_0^- + d_1^- s + d_2^+ s^2 + d_3^+ s^3 + d_4^- s^4 + \dots$$

$$p_2(s) = d_0^- + d_1^+ s + d_2^+ s^2 + d_3^- s^3 + d_4^- s^4 + \dots$$

$$p_3(s) = d_0^+ + d_1^- s + d_2^- s^2 + d_3^+ s^3 + d_4^+ s^4 + \dots$$

$$p_4(s) = d_0^+ + d_1^+ s + d_2^- s^2 + d_3^- s^3 + d_4^+ s^4 + \dots \quad (13)$$

۲.۳ استفاده از قضیه خاریتانوف در طراحی کنترل کننده مقاوم با توجه به رابطه ۱۰، تابع تبدیل مدل جریان پلازما به صورت رابطه ۱۴ به دست می آید:

$$G(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{b_i}{s-a} \quad (14)$$

$$a \in [-180.6, -15], b_i \in [7.52, 12.19]$$

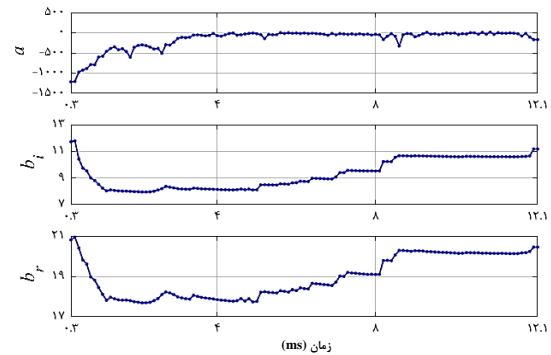
پارامترهای کنترل کننده $C(s) = k_p + \frac{k_i}{s}$ باید به گونه‌ای طراحی شوند که قادر باشند علاوه بر پایداری، عملکرد مناسب سیستم نامعین را نیز برآورده سازند. این طراحی براساس قضیه خاریتانوف انجام می‌شود. از این رو ابتدا چند جمله‌ای‌های خاریتانوف مربوط به صورت و مخرج تابع تبدیل به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$D_1(s) = s + 180.6 \quad N_1(s) = 7.52$$

$$D_2(s) = s + 15 \quad N_2(s) = 12.19$$

تمامی ترکیب‌های ممکن صورت و مخرج، چهار تابع تبدیل حلقه باز $(G_{ij}, i, j = 1, 2)$ را به صورت رابطه ۱۵ در اختیار خواهند گذاشت که توابع تبدیل خاریتانوف نامیده می‌شوند:

$$G_{ij}(s) = \frac{N_i(s)}{D_j(s)}, \quad i, j = 1, 2 \quad (15)$$



شکل ۸. تغییرات پارامترهای مدل جریان پلازما بر اساس داده‌های شات ۱۰.

جدول ۱. بازه تغییرات پارامترهای مدل دینامیکی جریان پلازما

متغیر	کمینه	بیشینه
a	-۱۸۰.۶	-۱۵
b_i	۷.۵۲	۱۲.۱۹
b_r	۱۳.۵۱	۲۱.۴۸
b_k	۹.۹۳	۱۴.۸۴
b_{ck}	۴.۰۴	۶.۵۲
b_{cz}	۱.۷۰	۲.۵۱
b_{cr}	۲.۹۸	۴.۷۴
γ	۵.۴۶	۹.۵۸

به منظور تخمین صحیح پارمتر a در شبیه‌سازی تحت کنترل موقعیت عمودی، تأثیر تغییرات پارمتر b_{cz} با توجه به مقدار نامی آن در شات ۴۰ مطابق رابطه ۴ به صورت رابطه ۱۰ در روند شناسایی اثر داده شده است:

$$E = \sum_{j=1}^N [Y(j) - \hat{a}U(j)]^2$$

$$Y = \dot{I}_p + b_i \dot{I}_i + b_r \dot{I}_r + b_{cz} \dot{I}_{cz}, \quad U = I_p \quad (10)$$

۳. اصول طراحی کنترل کننده تناسبی- انتگرالی مقاوم

با توجه به مدل استخراج شده برای دینامیک جریان پلازما در رابطه ۴ و میزان نامعینی پارامترهای آن در جدول ۱، لازم است کنترل کننده به نحوی طراحی شود که پایداری و عملکرد مطلوب حلقه بسته در حضور نامعینی‌های موجود تضمین گردد. با توجه به رابطه ۴، دینامیک جریان پلازما دارای دو ورودی بوده و تنها یک خروجی دارد. جهت ساده‌سازی در روند طراحی، رابطه ۴ را می‌توان به صورت رابطه ۱۱ بازنویسی کرد:

$$\dot{I}_p(t) = a I_p(t) + b_i u + d(t) \quad (1-11)$$

$$u = - \left(\dot{I}_i(t) + \frac{b_r}{b_i} \dot{I}_r(t) \right) \quad (2-11)$$

1. Hurwitz



$$\begin{aligned} \angle G(j\omega)C(j\omega) - \pi &= PM \\ \rightarrow \frac{k_p}{k_i} &= \frac{\tan\left(\gamma k\pi + \frac{\gamma\pi}{2} - \angle G(j\omega) + PM\right)}{\omega} \\ &= -\frac{\cos(PM - \angle G(j\omega))}{\omega \sin(PM - \angle G(j\omega))} \end{aligned} \quad (20)$$

با استفاده از رابطه‌های ۱۸ و ۱۹، روابط حاکم بر k_i و k_p جهت رسیدن به حد بهره مطلوب عبارت خواهد بود از:

$$k_p = \frac{\cos(\angle G(j\omega))}{GM|G(j\omega)|}, k_i = \frac{\omega \sin(\angle G(j\omega))}{GM|G(j\omega)|} \quad (21)$$

با استفاده از رابطه‌های ۱۷ و ۲۰، روابط حاکم بر k_i و k_p جهت رسیدن به حاشیه فاز مطلوب عبارت خواهد بود از:

$$\begin{cases} k_i = \frac{\omega \sin(PM - \angle G(j\omega))}{|G(j\omega)|} \\ k_p = -\frac{\cos(PM - \angle G(j\omega))}{|G(j\omega)|} \end{cases} \quad (22)$$

با توجه به رابطه‌های ۲۱ و ۲۲، واضح است که خط $k_i = 0$ برای فرکانس صفر یکی از جواب‌های این معادله است. جهت محاسبه پهنای باند سیستم حلقه بسته از رابطه ۲۳ استفاده می‌شود:

$$\left| \frac{G(j\omega_{Bw})C(j\omega_{Bw})}{1+G(j\omega_{Bw})C(j\omega_{Bw})} \right| = \frac{\sqrt{2}}{2} \left| \frac{G(j\omega)C(j\omega)}{1+G(j\omega)C(j\omega)} \right| \quad (23)$$

با جایگذاری رابطه ۱۶ در ۲۳ و با توجه به نامساوی مثلثی، داریم:

$$\begin{aligned} &\sqrt{2}|G(j\omega_{Bw})||j\omega_{Bw}k_p + k_i| \\ &\leq |j\omega_{Bw}| + |G(j\omega_{Bw})||j\omega_{Bw}k_p + k_i| \\ &\rightarrow |j\omega_{Bw}K_p + K_i| \leq \frac{|j\omega_{Bw}|}{(\sqrt{2}-1)|G_{ij}(j\omega_{Bw})|} \end{aligned} \quad (24)$$

بدیهی است ناحیه مشترک به دست آمده با استفاده از رابطه‌های ۲۱، ۲۲ و ۲۴ به یافتن ناحیه‌ای از صفحه $k_p - k_i$ که پایداری و عملکرد مقاوم را تضمین می‌نماید، منجر می‌شود.

۴. طراحی کنترل کننده تناسبی-انتگرالی مقاوم

با توجه به روابط ارائه شده در بخش ۳، در این بخش کنترل کننده مناسب جهت کنترل جریان پلاسما در توکامک

بنابراین با استفاده از این چهار تابع تبدیل می‌توان کنترل کننده مناسبی که دارای پایداری و عملکرد مقاوم است را برای کل سیستم نامعین طراحی کرد [۱۹].

۳.۳ اصول اولیه طراحی کنترل کننده تناسبی-انتگرالی با هدف پایداری و عملکرد مقاوم

در سیستم‌های کنترل علاوه بر برآورده‌سازی شرایط پایداری سیستم، دستیابی به عملکرد مناسب نیز قابل توجه است. عملکرد مطلوب در پاسخ فرکانسی به معنی داشتن حد بهره (GM)، حاشیه فاز (PM) و پهنای باند (ω_{Bw}) مناسب می‌باشد که به ترتیب با تابع حساسیت، درصد فراجش و زمان نشست مرتبط می‌باشند [۲۰]. در این بخش با استخراج معادلات مناسب، ارتباط ضرایب کنترل کننده تناسبی-انتگرالی (k_i و k_p) با مشخصات فرکانسی تابع تبدیل حلقه باز به منظور پایداری و عملکرد مطلوب سیستم حلقه بسته بررسی می‌شود. فرض کنید تابع تبدیل تک ورودی و تک خروجی کمینه فاز $G(s)$ موجود است و کنترل کننده تناسبی-انتگرالی برای این سیستم به صورت رابطه ۱۶ می‌باشد:

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (16)$$

بنابراین با جایگذاری تابع تبدیل کنترل کننده تناسبی-انتگرالی در شرایط مرز پایداری قضیه نایکوئیست، رابطه ۱۷ بدست می‌آید:

$$|C(j\omega)| = \frac{1}{|G(j\omega)|} \rightarrow \omega^\gamma k_p^\gamma + k_i^\gamma = \frac{\omega^\gamma}{|G(j\omega)|^\gamma} \quad (17)$$

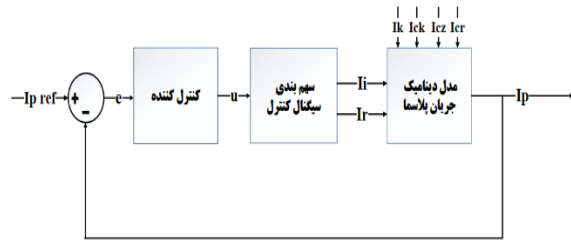
شرط دیگر قرار گرفتن در مرز ناپایداری برای سیستم حلقه بسته این است که زاویه فاز سیستم حلقه باز برابر با $(2k+1)\pi, k \in Z$ باشد. لذا با استفاده از مشخصات فاز:

$$\begin{aligned} \angle G(j\omega) + \tan^{-1}\left(\frac{\omega k_p}{k_i}\right) - \frac{\pi}{2} &= (2k+1)\pi \\ \frac{k_p}{k_i} &= \frac{\tan\left(\gamma k\pi + \frac{\gamma\pi}{2} - \angle G(j\omega)\right)}{\omega} = \frac{\cos(\angle G(j\omega))}{\omega \sin(\angle G(j\omega))} \end{aligned} \quad (18)$$

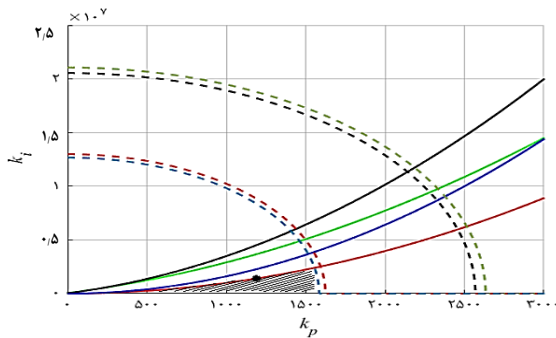
جهت دست یافتن به حد بهره (GM) و حاشیه فاز (PM) مطلوب با توجه به قضیه نایکوئیست، به ترتیب رابطه‌های ۱۹ و ۲۰ برقرار است.

$$\begin{aligned} GM|G(j\omega)C(j\omega)| &= 1 \\ \rightarrow \omega^\gamma k_p^\gamma + k_i^\gamma &= \frac{\omega^\gamma}{(GM)^\gamma |G(j\omega)|^\gamma} \end{aligned} \quad (19)$$

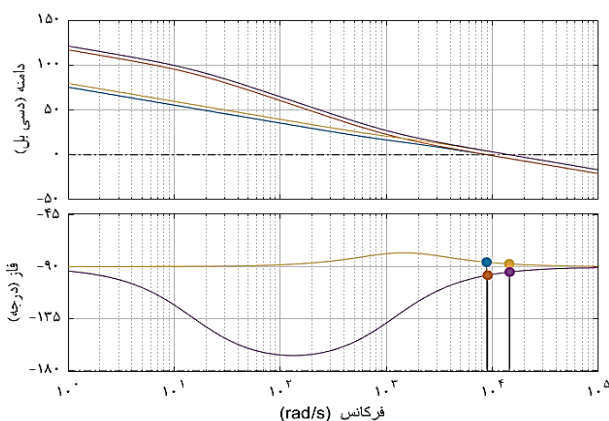




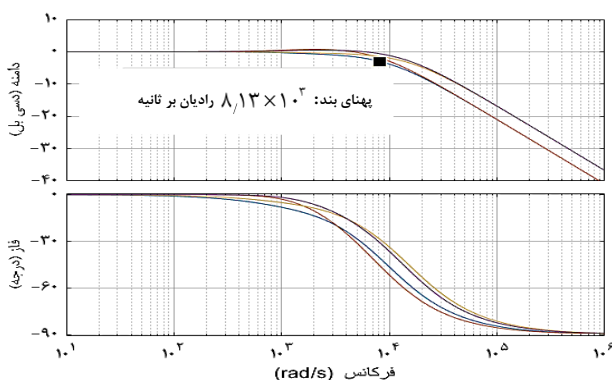
شکل ۹. دیاگرام بلوکی کنترل جریان پلاسما.



شکل ۱۰. ناحیه پایداری و عملکرد مقاوم کنترل کننده تناسبی- انتگرالی به منظور دست یافتن به اهداف کنترلی: G_{11} (سبز)- G_{12} (قرمز)- G_{21} (مشکی)- G_{22} (آبی)- ناحیه مطلوب پهنای باند: G_{11} (سبز، خط چین)- G_{12} (مشکی، خط چین)- G_{21} (قرمز، خط چین)- G_{22} (آبی، خط چین).



شکل ۱۱. پاسخ فرکانسی بهره حلقه سیستم‌های خاریتانونف در حضور کنترل کننده $G_{11}C$ (زرد)- $G_{12}C$ (قرمز)- $G_{21}C$ (آبی)- $G_{22}C$ (بنفش).



شکل ۱۲. پاسخ فرکانسی سیستم حلقه بسته و مقدار پهنای باند متناظر برای تمام سیستم‌های خاریتانونف و کنترل کننده طراحی شده.

دماوند ارایه می‌شود. لذا در ابتدا خواص مطلوب سیستم کنترل ارایه شده و بر اساس آن طراحی صورت خواهد پذیرفت. دیاگرام بلوکی شکل ۹ نشان‌دهنده وضعیت قرار گرفتن کنترل کننده جریان پلاسما است.

۱.۴ خواص مطلوب سیستم کنترل

به منظور دست یافتن به عملکرد مقاوم، ابتدا لازم است ویژگی‌های مطلوب مورد نظر معرفی شوند و بر اساس آن‌ها نواحی مربوطه استخراج گردند. در این جا فرضیات مطلوب طراحی عبارت است از:

۱. با توجه به مدل مرتبه اول جریان پلاسما بر اساس رابطه ۴، مشخص است که برای حد بهره محدودیتی وجود ندارد.
۲. با فرض فراجهدش بیشینه مطلوب ۰.۱٪، لازم است نسبت میرایی $\xi \geq 0.82$ باشد که با استفاده از آن مقدار حاشیه فاز به صورت $PM \geq 82^\circ$ انتخاب شده است.
۳. زمان نشست سیستم تحت کنترل نیز در حدود ۰.۵ ms در نظر گرفته شده است و بر اساس آن مقدار پهنای باند در حدود 8000 rad.s^{-1} خواهد بود.

۲.۴ طراحی کنترل کننده

با توجه به خواص مطلوب سیستم حلقه بسته، نواحی استخراج شده جهت پایداری و عملکرد مقاوم به صورت شکل ۱۰ خواهد بود. با انتخاب $k_p = 1189$ و $k_i = 1.4 \times 10^6$ می‌توان به اهداف کنترلی مدنظر دست یافت.

$$G_{11} = \frac{7.52}{s+18.06}, G_{12} = \frac{7.52}{s+15}$$

$$G_{21} = \frac{12.19}{s+18.06}, G_{22} = \frac{12.19}{s+15} \quad (25)$$

در شکل ۱۱ پاسخ فرکانسی بهره حلقه سیستم $G_{ij}(s) \times C(s)$ برای توابع تبدیل خاریتانونف رابطه ۲۵ و ضرایب انتخابی کنترل کننده همراه با حد فاز حاصل از طراحی مشاهده می‌شود. هم‌چنین در شکل ۱۲ پاسخ فرکانسی سیستم حلقه بسته با حضور کنترل کننده مقاوم طراحی شده و چهار سیستم رابطه ۲۵ نشان داده شده است.

۳.۴ سهم‌بندی تولید سیگنال کنترل

همان‌گونه که در رابطه ۱۱-۲ مشخص است، سیگنال کنترلی u بایستی توسط جریان دو سیم‌پیچ مرکزی و تعادلی تأمین شود. به این منظور از تئوری حاکم بر سیستم‌های دارای محرک‌های افزونه^۱ به منظور سهم‌بندی تأمین سیگنال کنترل استفاده می‌شود.

1. Over Actuated



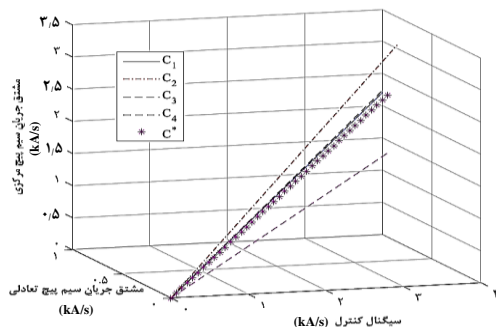
۴.۴ شبیه‌سازی سیستم کنترل جریان پلاسما به‌منظور ارزیابی نحوه عملکرد سیستم کنترل طراحی شده، شبیه‌سازی‌هایی در سه سناریو انجام پذیرفته است:

سناریوی ۱: ردیابی پروفایل دوزنقه‌ای با بیشینه دامنه جریان برابر ۱۵ kA در مدت زمانی حدود ۲۷ ms. در شکل ۱۴ نحوه ردیابی مشاهده می‌شود. در دو بخش پایینی شکل ۱۴ نیز دامنه دو سیگنال کنترل، قابل پیاده‌سازی بودن آن‌ها را نشان می‌دهد.

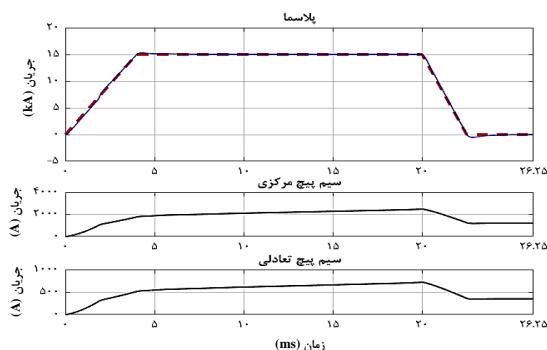
سناریوی ۲: ردیابی پروفایل با حداکثر دامنه جریان ۱۵ kA و سپس ۲۰ kA در مدت زمانی حدود ۲۷ ms. در شکل ۱۵ سیگنال مرجع و نحوه ردیابی مشاهده می‌شود. هم‌چنین دامنه جریان‌ها در سیم‌پیچ‌های مرکزی و تعادلی نیز قابل قبول است.

سناریوی ۳: ردیابی پروفایل دوزنقه‌ای با بیشینه دامنه جریان برابر ۱۵ kA، در حضور ورودی اغتشاشی در مدت زمانی حدود ۲۷ ms. در این سناریو اثر سیگنال‌های اغتشاشی (جریان‌های سایر سیم‌پیچ‌ها) بررسی شده است.

در شکل ۱۶، مشاهده می‌شود که جریان پلاسما به‌خوبی مقدار مرجع را ردیابی می‌کند و نوسان‌های ناچیزی که روی جریان پلاسما و جریان سیم‌پیچ‌های مرکزی و تعادلی مشاهده می‌شود، بیان‌گر نحوه تضعیف سیگنال اغتشاش در خروجی سیستم کنترل حلقه بسته است.



شکل ۱۳. نحوه سهم‌بندی سیگنال کنترل $u \in [0, 4]$ و مقادیر تخصیص داده شده به \dot{I}_r و \dot{I}_i به ازای ماتریس‌های تخصیص.



شکل ۱۴. پاسخ حلقه بسته دینامیک جریان پلاسما (خط توپر آبی) و ورودی مرجع (خط-چین قرمز)- سناریوی ۱ (بالاترین قسمت شکل) همراه جریان سیم‌پیچ مرکزی و تعادلی تولید شده توسط کنترل‌کننده (دو بخش پایینی شکل).

دو سیم‌پیچ مرکزی و تعادلی در تأمین سیگنال کنترل دارای محدودیت‌هایی به‌صورت زیر هستند:

$$I_i \leq \bar{I}_i = 6 \text{ kA}, I_r \leq \bar{I}_r = 1.5 \text{ kA} \quad (26)$$

با توجه به رابطه ۱۱-۲ ماتریس اثربخشی B^1 به‌صورت رابطه ۲۷ قابل بیان است:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & \frac{b_r}{b_i} \end{bmatrix} \quad (27)$$

از آن‌جا که b_r و b_i دارای مقادیر کمینه و بیشینه هستند، با استفاده از روش خارتانوف مقدار اثر بخشی به‌صورت چهار ماتریس زیر محاسبه شده و قابل بیان خواهد بود.

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\underline{b}_r}{\underline{b}_i} \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\underline{b}_r}{\underline{b}_i} \end{bmatrix}, B_3 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\bar{b}_r}{\bar{b}_i} \end{bmatrix}, B_4 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\bar{b}_r}{\bar{b}_i} \end{bmatrix} \quad (28)$$

با استفاده از روش شبه‌معکوس، ماتریس تخصیص کنترل متناظر با هر ماتریس اثربخشی را می‌توان محاسبه نمود [۲۱].

$$C_i = W^{-1} B_i^T (B_i W^{-1} B_i^T)^{-1}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (29)$$

که در آن W وزن‌دهی ورودی‌ها است و بر اساس نسبت تخلیه جریان‌های سیم‌پیچ مرکزی و سیم‌پیچ تعادلی آزمایش حلقه باز به‌صورت رابطه ۳۰ انتخاب می‌شود.

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 6 \end{bmatrix} \quad (30)$$

با توجه به مقادیر b_r و b_i ، ماتریس‌های تخصیص در رابطه ۳۱ نشان داده شده و شکل ۱۳ نیز مقادیر محاسبه شده \dot{I}_i و \dot{I}_r را به ازای تغییرات سیگنال کنترل نشان می‌دهد.

$$C_1 = \begin{bmatrix} 0.65 \\ 0.19 \end{bmatrix}, C_2 = \begin{bmatrix} 0.83 \\ 0.15 \end{bmatrix}, C_3 = \begin{bmatrix} 0.42 \\ 0.2 \end{bmatrix}, C_4 = \begin{bmatrix} 0.65 \\ 0.19 \end{bmatrix} \quad (31)$$

با توجه به این‌که روند طراحی مدنظر، یک طراحی مقاوم بوده و انتخاب یک ماتریس تخصیص بهینه که در تمامی حالت‌ها مورد استفاده قرار گیرد ضروری است، به این منظور ماتریس تخصیص بهینه C^* با استفاده از حل تابع هزینه ۳۲ حاصل می‌گردد.

$$\min_{C^*} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \|C_i - C^*\| \quad (32)$$

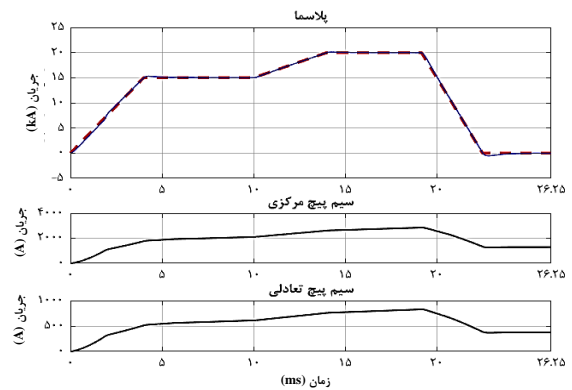
بر این اساس ماتریس بهینه عبارت است از:

$$C^* = \begin{bmatrix} 0.6408 \\ 0.1858 \end{bmatrix} \quad (33)$$

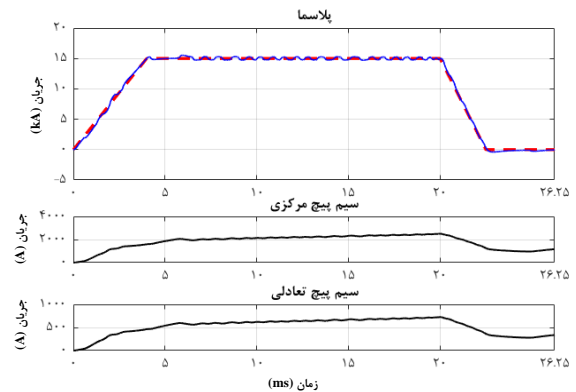
1. Effectiveness Matrix



- C. Rasouli, F. Abbasi Davani, *Identification of the plasma boundary shape and position in the Damavand tokamak*, *Plasma Phys. Reports*, **43(1)**, 1 (2017).
- R. Albanese, F. Villone, *The linearized CREATE-L plasma response model for the control of current, position and shape in tokamaks*, *Nucl. Fusion*, **38(5)**, 723 (1998).
- A.S. Sharma, et al, *Modeling and control of TCV*, *IEEE Trans. Control Syst. Technol*, **13(3)**, 356 (2005).
- F. Hofmann, J.M. Moret, D.J. Ward, *Stability analysis of the vertical position control loop in TCV using rigid and deformable plasma models*, *Nucl. Fusion*, **38(12)**, 1767, (1998).
- J.B. Lister, et al., *Plasma Equilibrium Response Modelling Experiments on the JT-60U and TCV Tokamaks*, (*Proc. 27th EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics*, 2000), 1-4.
- R. Albanese, et al, *Measurement of the open loop plasma equilibrium response in TCV*, *Nucl. Fusion*, **39(5)**, 663 (1999).
- Q.P. Yuan, et al, *Plasma current, position and shape feedback control on EAST*, *Nucl. Fusion*, **53(4)**, 1, (2013).
- A.J. Garrido, et al., *Linear models for plasma current control in tokamak reactors*, (*11th Int. Conf. Control. Autom. Robot. Vision*, no. December) 78-84 (2010).
- M. Ariola, A. Pironti, A. Portone, *Framework for the design of a plasma current and shape controller in next-generation tokamaks*, *Fusion Technol*, **36(3)**, 263, (1999).
- I. Garrido, et al., *Real time hybrid model predictive control for the current profile of the tokamak à configuration variable*, *Energies*, **9(8)**, 609 (2016).
- William R. Smythe, *Static and dynamic electricity*, 3rd ed. (Taylor & Francis, 1989).
- Y.K.M. Swain, et al., *Determination of plasma shape from poloidal field measurements on ISX-B*, No. ORNL/TM-7172. Oak Ridge National Lab., TN (USA), (1980).
- M. Fatahi, et al. *Optimal estimation of plasma boundary shape using magnetic probe measurements in Damavand tokamak* *Fusion Engineering and Design*, **170**, 112519 (2021).
- E. Noori, Y. Sadeghi, M. Ghoranneviss, *Application of poloidal beta and plasma internal inductance in determination of input power time of Damavand tokamak*, *J. Theor. Appl. Phys*, **10(4)**, 329 (2016).
- G.O. Ludwig, A. Montes, *Preliminary design of a small aspect ratio tokamak*, (*Res. Using Small Tokamaks*, 1988), 111-123 (1988).
- K. Sakurai, Y. Tanaka, T. Okuda, *Effect of Finite Conductivity on the Vertical Stability of a Tokamak Plasma Column with a Noncircular Cross Section without Conducting Shell*, *IEEE Trans. Fundam. Mater*, **97(8)**, 391 (1977).
- Shankar P. Bhattacharyya, H. Chapellat, L.H. Keel, *Robust Control: The Parametric Approach*, Har/Dskt ed, (Prentice Hall Information and System Science, 1995).
- N. Tan, et al, *Computation of stabilizing PI and PID controllers using the stability boundary locus*, *Energy Convers Manag*, **47**, 18-19, 3045 (2006).
- R. Salloum, B. Moaveni, M. Arvan, *Robust PID controller design for a real electromechanical actuator*, *Acta Polytech. Hungarica*, **11(5)**, 125, (2014).
- A. Johansen, Thor I. Fossen, *Control Allocation - A Survey*, *Computer Science, Mathematics*, **49(5)**, 1087 (2013).



شکل ۱۵. پاسخ حلقه بسته دینامیک جریان پلازما (خط توپر آبی) و ورودی مرجع (خط چین قرمز) - سناریوی ۲ (بخش بالایی) همراه جریان سیم پیچ مرکزی و تعادلی تولید شده توسط کنترل کننده (بخش پایینی).



شکل ۱۶. پاسخ حلقه بسته دینامیک جریان پلازما تحت کنترل موقعیت عمودی به عنوان ورودی اغتشاشی (خط توپر آبی) و ورودی مرجع (خط چین قرمز) - سناریوی ۳ (بخش بالایی) همراه جریان سیم پیچ مرکزی و تعادلی تولید شده توسط کنترل کننده (بخش پایینی).

۵. نتیجه گیری

در این مقاله معادلات دینامیکی پلازما بر اساس روش هامیلتون- لاگرانژ به دست آمد و پس از آن با استخراج مدل مداری پلازما، مدل دینامیک جریان پلازما برحسب جریان سیم پیچ ها استخراج شد. هم چنین با تقریب مدل غیر خطی و نیز خطی سازی حول نقطه کار، مدل خطی (ولی متغیر با زمان) از دینامیک جریان پلازما ارایه شد. سپس با استفاده از داده های تجربی از شات های توکامک دماوند، شبیه سازی مدل دینامیکی جریان پلازما در سه حالت مختلف صورت گرفت و انطباق خروجی مدل و جریان واقعی پلازما نشان داده شد. در ادامه یک کنترل کننده تناسبی- انتگرالی مقاوم همراه با روند طراحی آن به منظور کنترل نحوه تولید جریان پلازما، به نحوی که امکان ردیابی ورودی های مرجع متفاوت را دارا باشد، ارایه شد. نتایج شبیه سازی بیان گر عملکرد قابل قبول کنترل کننده در حضور نامعینی ها و غیر خطی گری ها بوده است.

مراجع

- M. Ariola, A. Pironti, *Magnetic Control of Tokamak Plasmas*, (Springer, 2016).

استناد به این مقاله

حسن زندی، معصومه فتاحی، بیژن معاونی، حسین رسولی (۱۴۰۰)، مدل سازی و طراحی سیستم کنترل مقاوم جریان پلازما در توکامک دماوند، ۹۶، ۵۲-۶۱

DOI: 10.24200/nst.2021.1200

Url: https://ionsat.nstri.ir/article_1200.html

