



ارائه شده توسط :

سایت ترجمه فا

مرجع جدیدترین مقالات ترجمه شده

از نشریات معابر

# تجزیه و تحلیل مشخصات کنترل دما برای راکتور سریع خنک شده با-سرب با

## چرخش طبیعی

### چکیده

راکتور سریع خنک شده با-سرب (LFR) با گردش طبیعی در سیستم اولیه، با توجه به برتری زیاد خود در ایمنی و قابلیت اطمینان راکتور، از جمله موارد برجسته در تحقیقات پیشرفته رآکتور هسته ای است. در این کار، یک ماتریس تابع انتقال برای توصیف فرآیند دینامیک دمای خنک کننده، که توسط تبدیل لاپلاس مدل دینامیک سیستم یک بعدی به دست آمده است، به منظور بررسی ویژگی های کنترل درجه حرارت LFR توسعه داده شده است. بر اساس ماتریس تابع انتقال، یک سیستم کنترل دمای خنک کننده حلقه-بسه بدون جبرانساز ساخته می شود. تجزیه و تحلیل حوزه فرکانس نشان می دهد که ثبات و حالت پایدار سیستم کنترل درجه حرارت نیاز به بهبود دارد. بر این اساس، یک جبرانساز درجه حرارت بر اساس نسبت-یکپارچگی و تغذیه-مستقیم طراحی شده است. شبیه سازی دینامیک سیستم کلی با جبرانساز دما برای تغییر گام توان هسته با RELAP5-HD و SIMULINK انجام می شود. نتیجه نشان می دهد که با توجه به بازده روش تجزیه و تحلیل حوزه فرکانس، جبرانساز درجه حرارت می تواند قابلیت های برتر کنترل دمای خنک کننده در LFR را با گردش طبیعی فراهم کند.

**کلمات کلیدی:** LFR، چرخش طبیعی، مشخصه کنترل دما، ماتریس تابع انتقال، روش تحلیل حوزه فرکانس

### ۱. مقدمه

راکتور سریع سرد شده با سرب (LFR) به عنوان یکی از شش فناوری انرژی هسته ای نویدبخش برای سیستم های پیشرفته آینده پیش بینی شده است و نیز به عنوان سیستمی برای سوزاندن اکتینیدها در حال حاضر در نظر گرفته شده است (Bianchi et al., 2006). در مقایسه با دیگر انواع راکتورهای هسته ای، LFR دارای بسیاری از مزایای ذاتی است (Wu et al., 2016).

(a) دمای جوش بالا و دمای ذوب پایین.

(b) ظرفیت گرمایی بالا.

(c) عدم واکنش پرانرژی با آب و هوا.

(d) محافظه بهتر در برابر اشعه گاما و نوترون های پر انرژی.

به علت مزایای فوق، LFR در طول سال های اخیر به تمرکز پژوهش های مختلف تبدیل شده است، چند LFRs

در بسیاری از کشورها طراحی شده است BREST (Orlov et al., 2008) و SVBR (Zrodnikov et al., 2008)

در روسیه (Cinotti et al., 2008) ElSY و MYRRHA (De Bruyn et al., 2007) در 2005

بر- Europe, SSTR (Smith et al., 2008) در ایالات متحده. در چین، مفاهیم راکتورهای نوآورانه مبتنی بر-

سرب و برخی از فناوری های کلیدی توسعه یافته است، مانند سیستم زیربحارانی (Wu et al.,

(Wu et al., 1999, 2002; Wu, 2011; Wu and FDS Team, 2008)

(Wu and FDS Team, 2011)، مواد ساختاری (Wu and FDS Team, 2007)، فناوری خنک کننده فلز مایع (Wu and FDS Team, 2007)

Team, 2009; Huang et al., 2011, 2004)، طراحی راکتور و غیره. هرچند، مطابق با مقالات منتشر شده

LFRها به ندرت در سراسر دنیا مورد بهره برداری قرار گرفته اند، به جز روسیه که در آن LFRها در

زیردریایی ها در طی اواسط دهه 1960 تا 1990 کاربرد داشتند (Alemberti et al., 2014).

به منظور مطالعه ویژگی های کنترل درجه حرارت، یک مدل تابع انتقال برای سیستم خنک کننده LFR لازم است.

از آنجا که مدل دینامیک سه بعدی دقیق بیش از حد پیچیده است که در استنتاج مدل تابع انتقال استفاده شود،

مدل پارامتر توزیع شده یک بعدی برای خطی شدن در حوزه زمان به کار گرفته می شود، و در حوزه فضایی برای

مدل سازی تابع انتقال گسسته می شود. یک ماتریس تابع انتقال توصیف کننده فرآیند دینامیک دمای خنک کننده

توسط تبدیل لاپلاس از مدل یک بعدی به دست می آید. این ماتریس تابع انتقال، این امکان را فراهم می کند که

ویژگی های سیستم کنترل درجه حرارت خنک کننده را می توان توسط روش تجزیه و تحلیل حوزه فرکانس

کلاسیک سیستم تک ورودی - تک خروجی مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. تجزیه و تحلیل حوزه فرکانس نشان می

دهد که سیستم کنترل درجه حرارت خنک کننده بدون جبرانساز، بی ثبات است و خطای حالت ماندگار به طور کامل نمی تواند حذف شود. بنابراین، یک جبرانساز درجه حرارت بر اساس نسبت-یکپارچگی و تغذیه-مستقیم برای بهبود عملکرد سیستم طراحی شده است. نسبت موجب بهبود تعادل می شود، یکپارچگی موجب حذف خطای حالت ماندگار می شود و تغذیه مستقیم، نرخ پاسخ را بهبود می بخشد. نتیجه شبیه سازی نشان می دهد که جبرانساز درجه حرارت می تواند قابلیت های کنترل دمای خنک کننده برتر را در LFR با گردش طبیعی فراهم کند.

ج ـ ظرفیت حرارتی	C
قطار	G
کنترلر PID	D
خطای حالت ماندگار	E
منطقه انتقال حرارت در واحد طول	F
نیروی جرم	f
کنترلر تقدیمه مستقیم ایده ال	FW
کنترلر تقدیمه مستقیم طراحی شده برای این کار	FW'
دبی جرمی (تابع جریان جرمی)	G
انتالپی	H
بهره حلقه باز	K
ضریب انگرالی جبران	KI
ضریب تناسب جبران	Kp
طول گره	I
جرم در واحد طول	M
تابع انتقال حلقه بسته	N
تعداد احاطه های نقطه در جهت عقربه های ساعت ۱۰ (۱۰۰) توسط متحنی های تایکوولیست	
P تعداد نقطهای	P
W <sub>origin-receiver</sub> و W <sub>origin-receiver</sub> در صفحه سمعت راست حلقه بسته	
توان حرارتی	T
اپراتور لایپلاس	Q
زمان	S
ماتریس تابع انتقال	T
ماتریس شامل متغیرهای ورودی یا خروجی	TJ
تابع انتقال حلقه باز	Th
مخخصات در فضای	W
ضریب انتقال حرارت	Z
ضریب تناسب B بین $\Delta h$ و $\Delta \rho$	Z
ضریب تناسب C بین $\Delta T$ و $\Delta \rho$	Z
تغییر خاصیت D (انتقال در پیرامون حالت ماندگار) و ضعیت	Z

ضریب تناسب بین $\Delta T$ و $\Delta H$	$\eta$
چگالی	$\rho$
زمان تاخیر سیستم	$\tau$
اندیس ها	Subscripts
دبي جرمي هواي ورودي خنك كننده هوا	<i>airin</i>
پوشش اطراف گره سوخت	<i>clad</i>
دمای ورودی هسته	<i>corein</i>
دمای خروجی هسته	<i>coreout</i>
سوخت	<i>fuel</i>
شقاف بين سوخت و پوشش	<i>gap</i>
دبي جرمي ورودي به دبي جرمي خروجی در يك گره	<i>GG</i>
دبي جرمي ورودي به خروجی آنتالبي در يك گره	<i>Gt</i>
دمای خروجی در سمعت ثانويه مبدل حرارتی	<i>hextout</i>
آنتالبي ورودي به دبي جرمي خروجی در يك گره	<i>hG</i>
آنتالبي ورودي به خروجی آنتالبي در يك گره	<i>hh</i>
ورودي گره	<i>in</i>
مقدار اوليه پaramتر ورودي در يك گره	<i>in0</i>
گره [آم	<i>j</i>
گره خنك كننده با طول L	<i>l</i>
خروجی گره	<i>out</i>
مقدار اوليه پaramتر خروجی در يك گره	<i>out0</i>
طرف اصلی	<i>p</i>
خروجی جريان جرمي پسب در ثانويه	<i>pumpgout</i>
سمت ثانويه	<i>s</i>
ديواره لوله	<i>w</i>

## 2. مدل تابع انتقال سیستم خنك کننده

### 2.1. پaramترهای اصلی طراحی راکتور

راکتور سریع نوع استخراج خنك شده - 10 MWth LBE هدایت شده توسط گردش طبیعی طراحی شده است.

LBE به عنوان سوختی انتخاب می شود که غنی سازی جرم U235 در حدود 19.75٪ است. این LBE به عنوان

مایع خنک کننده برای حلقه اولیه انتخاب می شود. متوسط دماهای LBE ورودی و خروجی هسته به ترتیب در حدود 4 K و 535 K هستند. فشار گاز پوشش در حلقه اولیه، حدود 0.05 مگاپاسکال است. آب تحت فشار (4 مگاپاسکال) به عنوان خنک کننده مدار ثانویه انتخاب می شود. متوسط دماهای ورودی و خروجی آب در مبدل حرارتی (HEX) به ترتیب حدود 490 K و 501 K بود. حرارت تولید شده در راکتور به سینک (چاهک) نهایی (جو) توسط خنک کننده هوا منتشر می شود. پارامترهای اصلی راکتور سریع خنک شده-LBE گردش طبیعی در جدول 1 نشان داده شده است.

## 2.2. مدل سازیتابع انتقال

در این بخش، بحث ما در روش مدلسازی تابع انتقال فرآیند دینامیک دمای خنک کننده در راکتور هدف گذاری شده است. برای ساده سازی، یک مدل لوله مبدل حرارتی تک فاز اشاره شده است. مدل های دیگر، از جمله مدل هسته راکتور، مدل مبدل - حرارتی اولیه و ثانویه (HEX)، به طور رسمی برابر هستند.

روش اصل اول هیدرولیک- حرارتی برای توصیف رفتار دینامیکی هیدرولیک- حرارتی راکتور در نظر گرفته شده است:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(Gh)}{\partial z} - q_l = 0 \quad (2)$$

مطابق با روش Colombo et al. (2010)، که در شکل 1 نشان داده شده است، (طول هر گره برابر با 1 است و تعداد گره ها،  $n$  است)، ماتریس تابع انتقال را می توان مطابق با طرح تفاضل محدود به سمت عقب استنتاج نمود:

$$\begin{pmatrix} \Delta h_{out}(s) \\ \Delta G_{out}(s) \end{pmatrix} = Tf \begin{pmatrix} \Delta h_{in}(s) \\ \Delta G_{in}(s) \\ \Delta q_l(s) \end{pmatrix} \quad (3)$$

که در آن

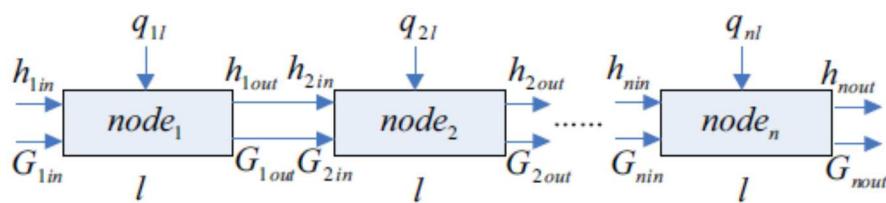
$$Tf(s) = \begin{pmatrix} \frac{G_{out0}}{l\rho_{out0}s+G_{out0}} & \frac{h_{in0}-h_{out0}}{l\rho_{out0}s+G_{out0}} & \frac{1}{l\rho_{out0}s+G_{out0}} \\ \frac{-\beta l G_{out0}s}{l\rho_{out0}s+G_{out0}} & \frac{[\rho_{out0}-\beta(h_{in0}-h_{out0})]ls+G_{out0}}{l\rho_{out0}s+G_{out0}} & \frac{-\beta ls}{l\rho_{out0}s+G_{out0}} \end{pmatrix} \quad (4)$$

در این مدل، وابستگی چگالی به آنتالپی را می توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\Delta\rho = \beta\Delta h \quad (5)$$

جدول 1: پارامترهای هندسی اصلی هسته راکتور سریع خنک شده-LBE گردش طبیعی

پارامتر	واحد	مقدار
توان هسته	MW	10
دماهی ورودی هسته	K	535
دماهی خروجی هسته	K	665
سوخت فیسیون	-	UO <sub>2</sub> (19.75%)
نیروی محركه در LBE	-	Buoyancy force
خنک کننده ثانویه	-	Water
فشار خنک کننده حلقه ثانویه	MPa	4
دماهی ورودی خنک کننده سمت ثانویه HEX	K	490
دماهی خروجی خنک کننده سمت ثانویه HEX	K	501
سینک حرارتی	-	Air cooler
پوشش	-	316Ti
ساختار	-	316L



شکل 1. ساختار مدل لوله تک فاز

معادلات (3) و (4)، مدل تابع انتقال هیدرولیک حرارتی نامتغیر به زمان خطی است که سه ورودی سیستم را به دو خروجی سیستم مرتبط می‌نماید. لوله تک فاز دارای  $n$  گزه است که می‌توانند به صورت معادلات زیر توصیف شوند:

$$Th_{jout}(s) = Tf_j(s) \times Th_{jin}(s) \quad (6)$$

$$Th_{(j+1)in}(s) = \begin{pmatrix} Th_{jout}(s) \\ \Delta q_{(j+1)l}(s) \end{pmatrix} \quad (7)$$

که در آن  $Tf_i$  به معنی ماتریس تابع انتقال گره  $j$ ام در لوله است،  $Th_{jin}$  و  $Th_{jout}$  به صورت زیر توصیف می‌شوند:

$$Th_{jin} = \begin{pmatrix} \Delta h_{jn}(s) \\ \Delta G_{jn}(s) \\ \Delta q_{jl}(s) \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$Th_{jout} = \begin{pmatrix} \Delta h_{jout}(s) \\ \Delta G_{jout}(s) \end{pmatrix} \quad (9)$$

### (1) مدلسازی تابع انتقال هسته

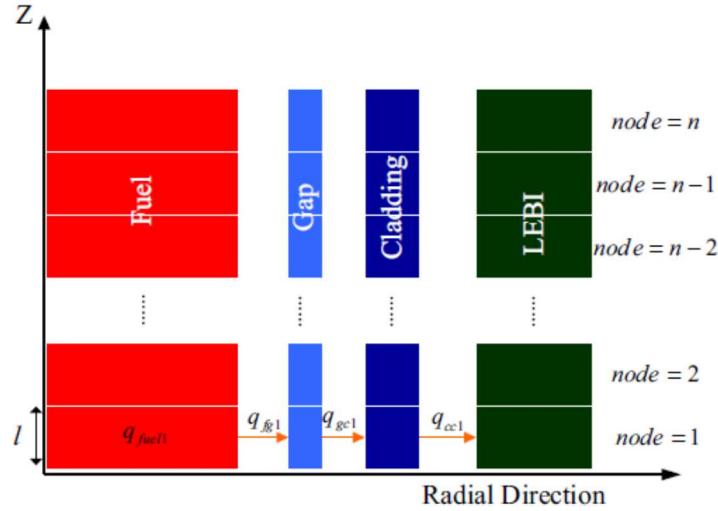
یک مدل حرارتی هسته کانال تک یک-بعدی را می‌توان به صورت شکل 2 نشان داد (فرآیند انتقال حرارت در جهتشعاعی، نادیده گرفته می‌شود. در جهت  $Z$ ، سوخت، شکاف، پوشش و خنک کننده به  $n$  گره با طول 1 تقسیم می‌شوند). در این مدل، مختصات محور مرکزی میله سوخت، صفر است.

مطابق با معادله انتشار حرارت، تابع انتقال حرارت از سوخت تا پوشش را می‌توان به صورت زیر ارائه نمود:

$$\Delta T_{cladj}(s) = \frac{\alpha_{gap} f_{gap} \Delta T_{gapj}(s) + \alpha_{clad} f_{clad} \Delta T_{jin}(s)}{m_{cladj} c_{cladj} s + \alpha_{gap} f_{gap} + \alpha_{clad} f_{clad}} \quad (10)$$

$$\Delta T_{gapj}(s) = \frac{\alpha_{fue} f_{fuel} \Delta T_{fuelj}(s) + \alpha_{gap} f_{gap} \Delta T_{cladj}(s)}{m_{gapj} c_{gapj} s + \alpha_{fue} f_{fuel} + \alpha_{gap} f_{gap}} \quad (11)$$

$$\Delta T_{fuelj}(s) = \frac{\Delta q_{fuelj} + \alpha_{fue} f_{fuel} \Delta T_{gapj}(s)}{m_{fuelj} c_{fuelj} s + \alpha_{fuel} f_{fuel}} \quad (12)$$



شکل 2. مدل انتقال حرارت تک-بعدی هسته راکتور

$$\Delta q_{lj}(s) = \frac{\alpha_{clad} f_{clad} (\Delta T_{cladj}(s) - \Delta T_{jin}(s))}{4l/d} \quad (13)$$

مطابق با تخمین Boussinesq، وابستگی دما به چگالی را می‌توان در چرخش طبیعی در نظر گرفت  
(Sabharwall et al., 2012)

$$\Delta T = \gamma \Delta \rho \quad (14)$$

که در آن  $\gamma$ ، ضریب ثابت است.

معادله (5) را در نظر بگیرید که:

$$\Delta T = \eta \Delta H \quad (15)$$

where

$$\eta = \gamma \cdot \beta \quad (16)$$

متغیر توان حرارتی  $\Delta q_{fuelj}$  را می‌توان به عنوان ورودی سیستم انتقال حرارت در نظر گرفت. برای دیگری،  
متغیرهای دمای  $\Delta T_{fuelj}$   $\Delta T_{gapj}$   $\Delta T_{cladj}$  را می‌توان توسط معادلات (10)-(12) محاسبه نمود. معادلات (3)  
و (10)-(13)، مدل تابع انتقال فرآیند انتقال حرارت در هسته راکتور را تشکیل می‌دهند.

## (2) مدلسازی تابع انتقال HEX

HEX به لوله های مستقیم، مدل گذر تک (شکل 3) ساده سازی می شود که در آن جریان LBE به سمت اولیه است و جریان آب تک فاز به سمت بالای سمت ثانویه است. بنابراین، توابع انتقال فرآیند انتقال حرارت بین دیواره و آب را می توان به صورت زیر توصیف نمود:

$$\Delta T_{wj}(s) = \frac{\alpha_{ws}f_{ws}\Delta T_{sjin}(s) + \alpha_{wp}f_{wp}\Delta T_{pjin}(s)}{m_{wj}C_{wj}s - \alpha_{wp}f_{wp} + \alpha_{ws}f_{ws}} \quad (17)$$

$$\Delta q_{plj}(s) = \frac{\alpha_{wp}f_{wp}(\Delta T_{wj}(s) - \Delta T_{pjin}(s))}{4l_p/d_p} \quad (18)$$

$$\Delta q_{slj}(s) = \frac{\alpha_{ws}f_{ws}(\Delta T_{wj}(s) - \Delta T_{sjin}(s))}{4l_s/d_s} \quad (19)$$

معادلات (3) و (17)-(19) به منزله مدل تابع انتقال برای فرآیند انتقال حرارت در HEX هستند که می توان در شکل 3 دید (انتقال حرارت بین گره های مجاور دیواره لوله نادیده گرفته می شود).

## (3) مدلسازی تابع انتقال کانال خنک کننده

فرض می شود که کانال خنک کننده، شامل کانال بالاتر، فضای اشغال شده بالاتر، آینده پایین و فضای اشغال شده پایین، از نظر حرارتی ایزوشه است، و انتقال حرارت بین گره های دیواره لوله مجاور نادیده گرفته می شود. مطابق با روش در بخش 3.1، مدلسازی تابع انتقال گره کانال خنک کننده  $\Delta q_l = 0$  ارائه نمودن

نمود:

$$\begin{pmatrix} \Delta h_{jout}(s) \\ \Delta G_{jout}(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} TF_{hh} & TF_{Gh} \\ TF_{hG} & TF_{GG} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta h_{jin}(s) \\ \Delta G_{jin}(s) \end{pmatrix} \quad (20)$$

که در آن

$$TF_{hh} = \frac{G_{jout0}}{l\rho_{jout0}s + G_{jout0}} \quad (21)$$

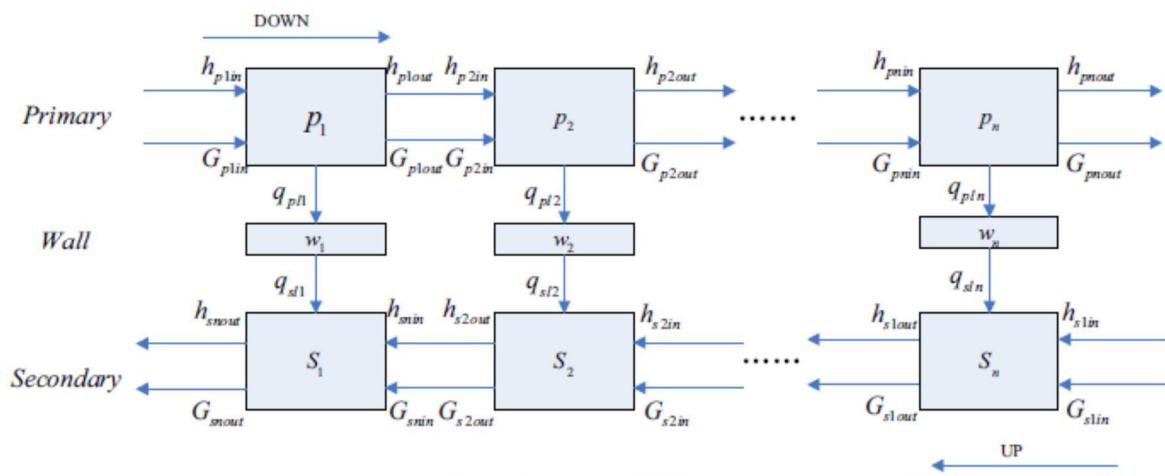
$$TF_{Gh} = \frac{h_{jin0} - h_{jout0}}{l\rho_{jout0}s + G_{jout0}} \quad (22)$$

$$TF_{hG} = \frac{-\beta l G_{out0} s}{l \rho_{jout0} s + G_{jout0}} \quad (23)$$

$$TF_{GG} = \frac{[\rho_{out0} - \beta(h_{in0} - h_{out0})]ls + G_{out0}}{l \rho_{jout0} s + G_{jout0}} \quad (24)$$

#### (4) خنک کننده هوا و پمپ

می توان در نظر گرفت که خنک کننده هوا دارای همان ساختار HEX است. مرز نرخ جریان به جای پمپ در حلقه ثانویه و فن در خنک کننده هوا استفاده می شود.



شکل 3. ساختار مدل مبدل- حرارتی دارای n گره است، شامل سمت اولیه، سمت ثانویه و دیواره لوله می شود

### 3. تحلیل حوزه فرکانسی و طراحی جبرانساز

در این بخش، یک استراتژی کنترل درجه حرارت برای اولین بار ارائه می شود. بر اساس این استراتژی، یک حلقه کنترل درجه حرارت بدون هر گونه جبران ساخته می شود، و در حوزه فرکانس تحلیل می شود. این تجزیه و تحلیل، ویژگی های سیستم کنترل درجه حرارت، از جمله ثبات و حالت پایدار را ارائه می دهد. با توجه به نتیجه تجزیه و تحلیل، کنترلر درجه حرارت برای جبران سیستم طراحی شده است. علاوه بر این، یک کنترلر تغذیه مستقیم نیز برای جبران تاخیر زمانی بزرگ در سیستم کنترل درجه حرارت معرفی می شود.

### 3.1 استراتژی کنترل دما

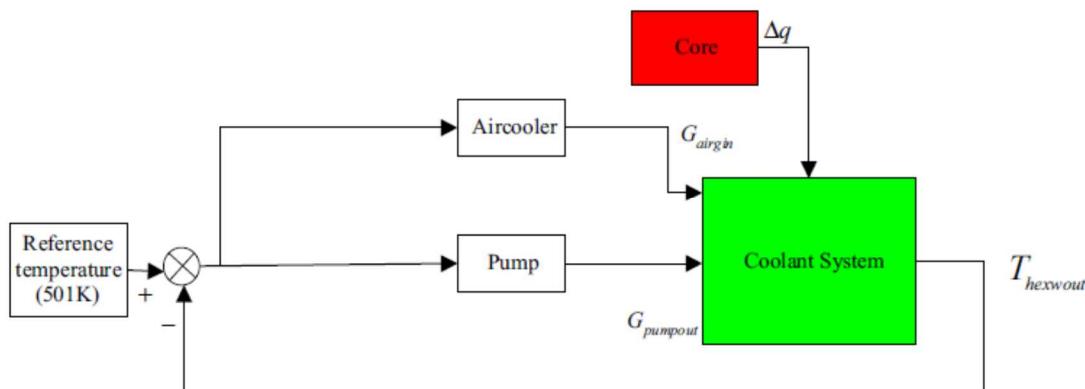
هدف از سیستم کنترل درجه حرارت، اطمینان از ایمنی سیستم خنک کننده در حضور اغتشاش توان است. برای یک راکتور، متغیرهای حیاتی، دمای مایع خنک کننده در هسته و HEX هستند که می‌تواند حالت جریان انرژی و ویژگی امنیتی در راکتور را منعکس کند. بر این اساس، دو استراتژی کنترل وجود دارند: (1) ثابت نگه داشتن دمای خنک کننده در هسته (استراتژی کنترل A) (Yan و همکاران، 2014); (2) ثابت نگه داشتن دمای خروجی خنک کننده در سمت ثانویه HEX (استراتژی کنترل B). مزیت اصلی استراتژی کنترل A، اطمینان از امنیت حلقه اولیه و جلوگیری از ذوبه هسته ای و یا جامد شدن LBE است. با این حال، استراتژی کنترل A می‌تواند تغییرات زیادی را در فشار و دمای حلقه ثانویه موجب شود. در طراحی مرجع بخش 2.1، خنک کننده در حلقة آب تک فاز با 4 مگاپاسکال است. تغییر بزرگ دما و فشار می‌تواند به مشکلات جدی در حلقة آب تک فاز منجر شود. بنابراین، استراتژی کنترل B در این کار اتخاذ شده است. با توجه به حاشیه امنیت کافی LBE، درجه حرارت در هسته نیز با خیال راحت تحت اختلال توان قرار می‌گیرد.

شکل 4 حلقه کنترل را بدون هر گونه جبرانساز نشان می‌دهد. جایی که در آن  $\Delta q$ , متغیر کنترل شده است که می‌تواند توسط پمپ و خنک کننده هوا تنظیم شود. اغتشاش توان هسته  $\Delta q$ , اختلال سیستم است. مقدار مرجع  $\Delta q$  برابر با  $501 \text{ K}$  می‌باشد.

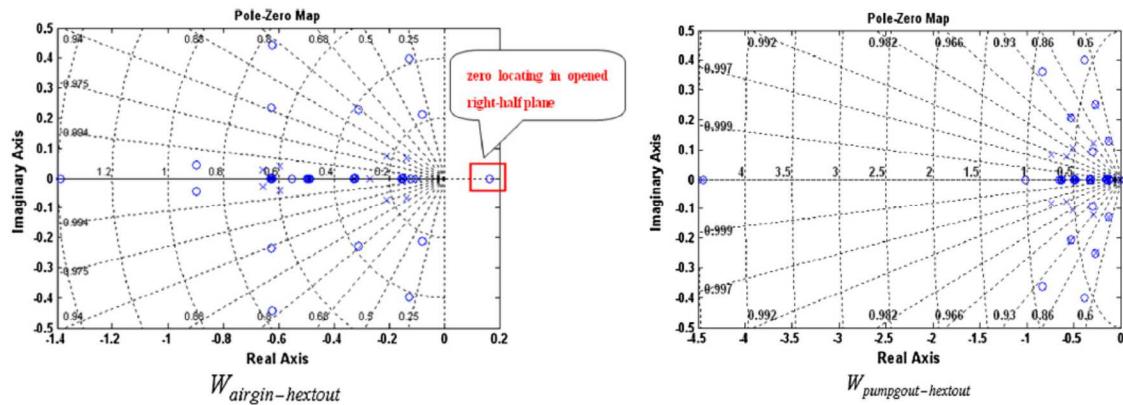
### 3.2 گزینه روش تجزیه و تحلیل

منحنی های مشخصه مکان هندسی ریشه، دامنه-فاز (نایکوئیست) و منحنی های مشخصه فرکانس لگاریتمی (Bode)، ابزارهای تجزیه و تحلیل سیستم هستند که مشخصه خود را دارند. یک ابزار تجزیه و تحلیل سیستم مناسب باید از سه ابزار تجزیه و تحلیل بالا انتخاب شود. توزیعات صفرها و قطب های حلقه باز می‌توانند یک مرجع برای انتخاب ابزار تجزیه و تحلیل را ارائه کنند.

با توجه به شکل ۴، توابع انتقال حلقه باز این سیستم،  $W_{\text{pumpgout-hextout}}$  و  $W_{\text{airgin-hextout}}$  هستند. ماتریس  $W_{\text{pumpgout-hextout}}$  تابع انتقال در بخش ۲ نشان می دهد که این سیستم خنک کننده دارای یک ساختار چند کanal پیچیده است. بنابراین، صفرها و قطب های  $W_{\text{pumpgout-hextout}}$  و  $W_{\text{airgin-hextout}}$  به سختی حل می شوند. به همین دلیل، ابزار تجزیه و تحلیل سیستم خطی (2007) SIMULINK برای محاسبه توزیعات اتخاذ می شود. توزیعات قطب ها و صفرهای  $W_{\text{pumpgout-hextout}}$  و  $W_{\text{airgin-hextout}}$  داده شده توسط ابزار تجزیه و تحلیل سیستم خطی سیمولینک در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴. حلقه کنترل بدون جبرانسازها

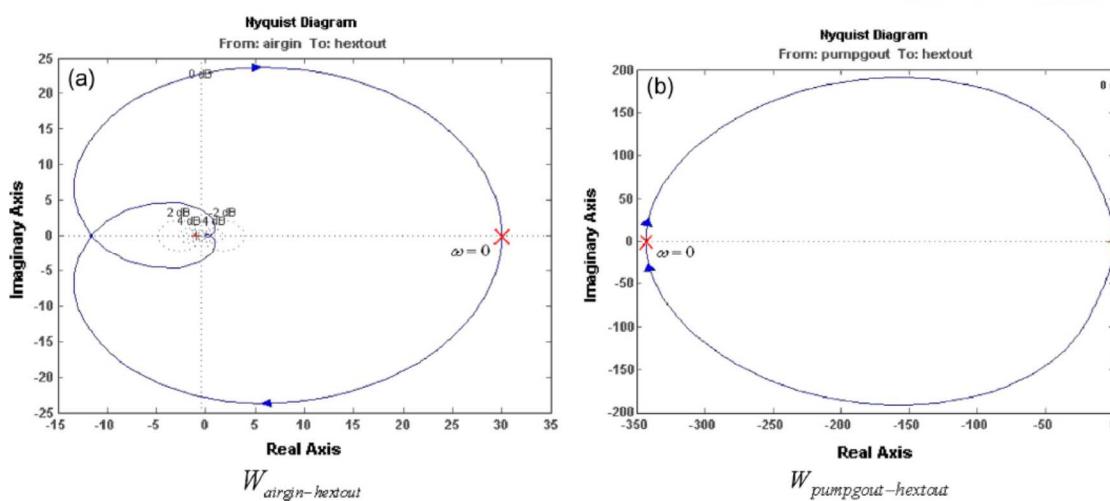


$W_{\text{pumpgout-hextout}}$  و  $W_{\text{airgin-hextout}}$

شکل ۵. توزیعات صفرها و قطب های  $W_{\text{pumpgout-hextout}}$  و  $W_{\text{airgin-hextout}}$  که در آن X به معنی قطب و 0 به معنی صفر می باشد.

دو ویژگی مهم این توابع انتقال را می‌توان از شکل 5 نتیجه گرفت: (1) تعداد زیادی از صفرها و قطب‌ها در نقشه‌های قطب-صفر وجود دارد، و استخراج قطب‌های غالب دشوار است؛ (2) یک صفر  $W_{\text{airgin-hextout}}$  واقع در صفحه نیمه راست وجود دارد. اولین نکته به معنای اینست که روش مکان هندسی ریشه را نمی‌توان برای تجزیه و تحلیل استفاده نمود، زیرا نمودارهای مکان هندسی ریشه بسیار پیچیده هستند و نمی‌توانند با توجه به قطب‌های غالب ساده سازی شوند؛ نقطه ثانویه به معنی اینست که منحنی‌های Bode نیز در دسترس نمی‌باشند زیرا نمی‌توانند برای تجزیه و تحلیل پایداری سیستم غیر حداقل (benjamin, 2003) استفاده شوند. بنابراین، تنها منحنی‌های نایکوئیست را می‌توان به عنوان یک ابزار تجزیه و تحلیل برای

$W_{\text{pumpgout-hextout}}$  و  $W_{\text{airgin-hextout}}$  انتخاب نمود.



شکل 6. منحنی‌های نایکوئیست  $W_{\text{pumpgout-hextout}}$  و  $W_{\text{airgin-hextout}}$ .

### 3.3. تجزیه و تحلیل حوزه فرکانس با نایکوئیست

#### (1) حالت پایدار

با توجه به منحنی‌های نایکوئیست  $W_{\text{pumpgout-hextout}}$  و  $W_{\text{airgin-hextout}}$  (شکل 6)، بهره‌های حالت پایدار این دو تابع انتقال ( $W = 0$ ) محدود می‌شود (بهره‌های حالت پایدار  $W_{\text{airgin-hextout}}$  حدود 30 دسی بل، بهره‌های

حالت پایدار  $W_{airgin-hextout}$  حدود 345 دسی بل است). این بدان معنی است که خطای حالت ماندگار

$M_{pumpgout-hextout}$  تحت ورودی پله را نمی توان به طور کامل حذف نمود.

## (2) پایداری

با توجه به معیار نایکوئیست،  $M_{pumpgout-hextout}$  و  $M_{airgin-hextout}$  بدون هیچ جبرانساز، ناپایداری هستند، زیرا

تعداد احاطه ها در جهت عقربه های ساعت برای نقطه  $(-1, j0)$  توسط منحنی  $N^+$ ، که در آن،  $N^+ + P \neq 0$

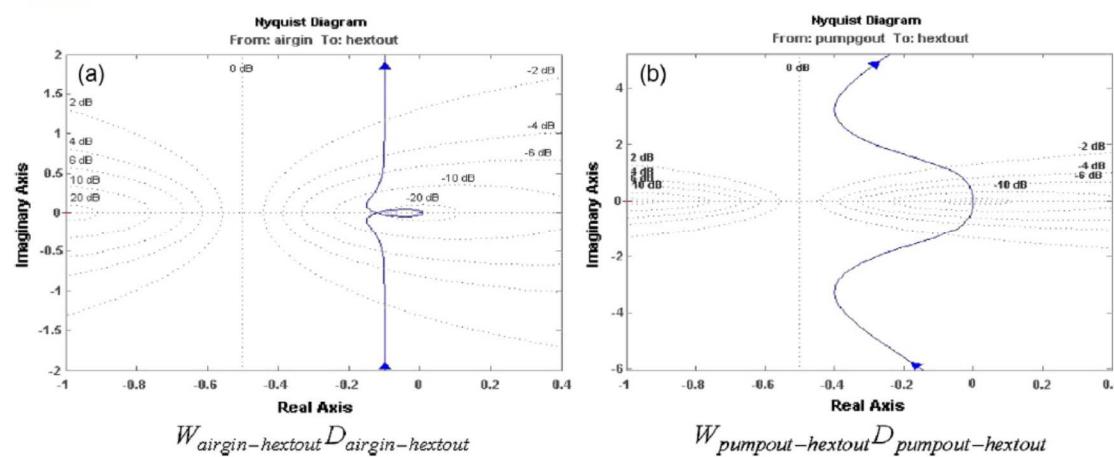
نایکوئیست است،  $P$  تعداد قطب های  $W_{hexgin-hextout}$  و  $W_{airgin-hextout}$  در صفحه نیمه راست بسته است.

### 3.4. نسبت-ادغام طراحی جبران

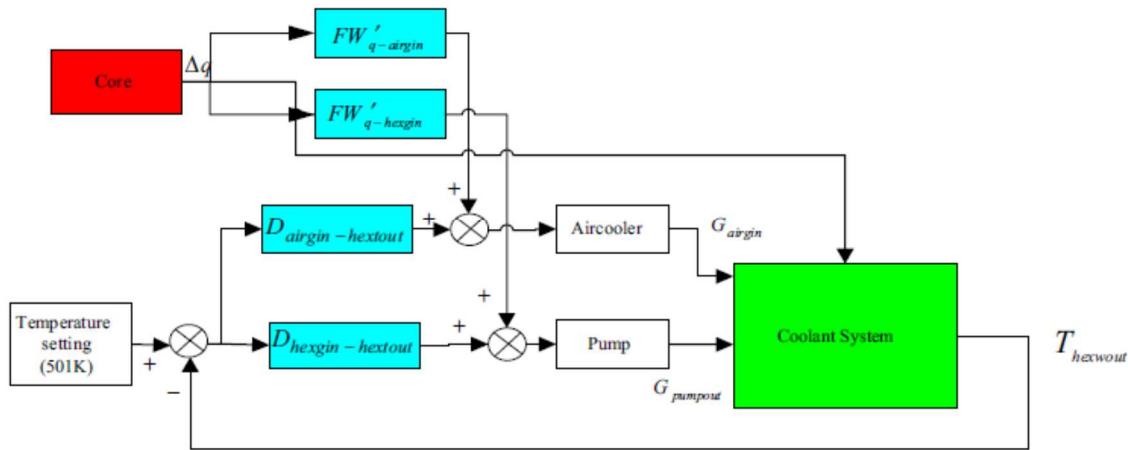
تجزیه و تحلیل حوزه فرکانس نشان می دهد که جبران نیاز به ثبات بهبود و از بین بردن خطای حالت ماندگار سیستم های کنترل در شکل طراحی شده است.

4. برای این منظور، انтگرال متناسب (PI) کنترل به عنوان جبران سیستم معرفی (یوشیاکی و همکاران، 2013).

عبارات کنترل را می توان به عنوان زیر نشان داد:



شکل 7. منحنی های نایکوئیست  $W_{pumpgout-hextout} D_{pumpgout-hextout}$  و  $W_{airgin-hextout} D_{airgin-hextout}$



شکل 8. سیستم کنترل دما با PI و جبرانساز تغذیه مستقیم

### 3.4 طراحی جبرانساز انتگرالی-تناسبی

تحلیل حوزه فرکانسی نشان می دهد که یک جبرانساز برای بهبود پایداری و حذف خطای حالت ماندگار سیستم کنترل در شکل 4 طراحی شود. برای این منظور، کنترلر (PI) انتگرالی-تناسبی به عنوان جبرانساز سیستم معرفی می شود (Yoshiaki et al., 2013). عبارات کنترلر را می توان به صورت زیر نمایش داد:

$$D_{airgin-hextout} = Kp_{airgin-hextout} + \frac{Ki_{airgin-hextout}}{s} \quad (25)$$

$$D_{pumpgout-hextout} = Kp_{pumpgout-hextout} + \frac{Ki_{pumpgout-hextout}}{s} \quad (26)$$

منحنی های نایکوپیست در شکل  $W_{pumpgout-hextout} D_{pumpgout-hextout}$  و  $W_{airgin-hextout} D_{airgin-hextout}$  نشان داده شده اند. مشخص می شود که حلقه کنترل با جبرانسازهای

7 نشان داده شده اند. مشخص می شود که حلقه کنترل با جبرانسازهای  $D_{airgin-hextout}$  و  $Kp_{airgin-hextout}$  پایداری است، به دلیل اینکه  $P = 0$  و  $N^+ = 0$  و  $D_{pumpgout-hextout}$

$Kp_{pumpgout-hextout}$  می توانند حاشیه پایداری بالایی را به همراه بیاورند که موجب می شود که سیستم در حال اجرا پایدار شود، زمانی که پارامترهای ادوات سیستم رانش پیدا می کنند. زمانی که  $\omega = 0$ ، بهره های حالت

پایدار  $W_{pumpgout-hextout}D_{pumpgout-hextout}$  و  $W_{airgin-hextout}D_{airgin-hextout}$  بی نهایت هستند، زیرا

عناصر انتگرالی موجب بهبود مشخصات حالت پایدار می شوند. معادلات (27) و (28)، خطای حالت پایدار حلقه کنترل را تحت ورودی پله نشان می دهند.

$$\begin{aligned} e_{airgin-hextout} &= \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{1}{1 + D_{airgin-hextout} W_{airgin-hextout}} \cdot \frac{1}{s} \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s}{s + (Kp_{airgin-hextout}s + Ki_{airgin-hextout})W_{airgin-hextout}} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (27)$$

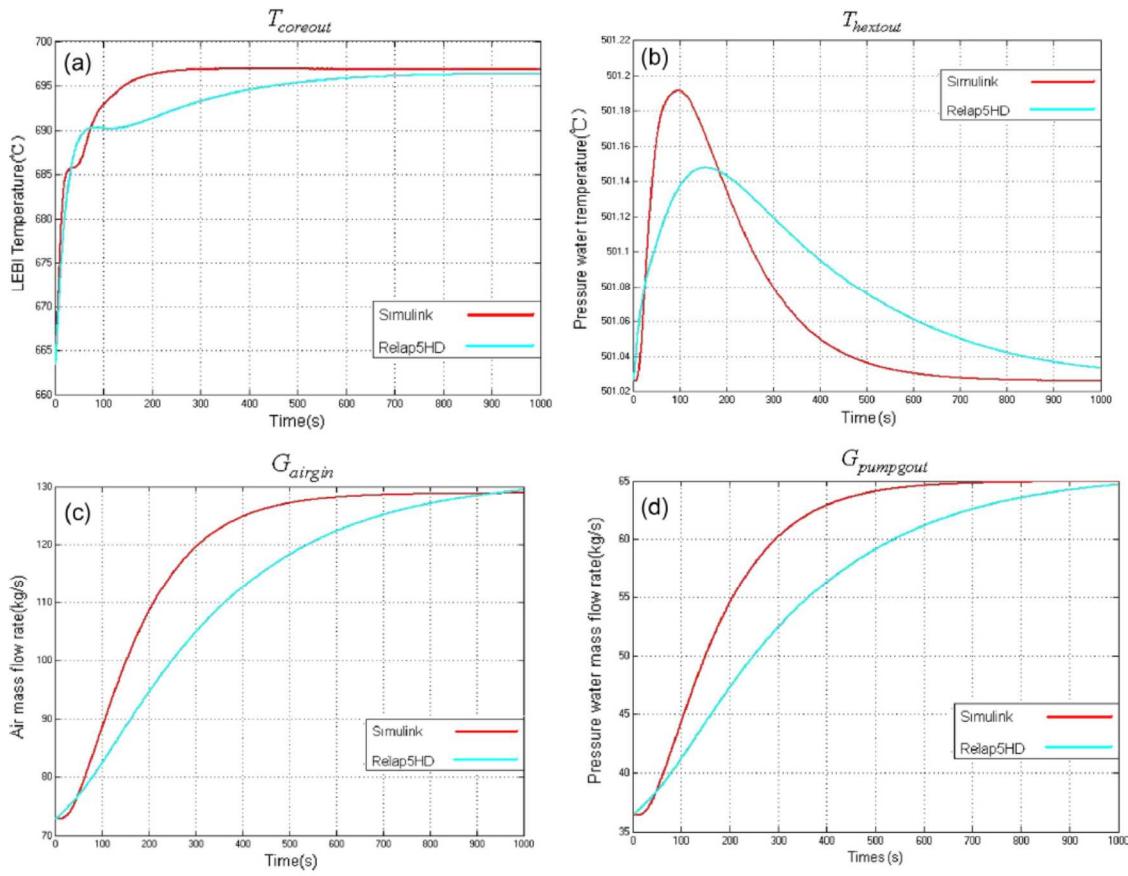
$$\begin{aligned} e_{pumpgout-hextout} &= \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{1}{1 + D_{pumpgout-hextout} W_{pumpgout-hextout}} \cdot \frac{1}{s} \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s}{s + (Kp_{pumpgout-hextout}s + Ki_{pumpgout-hextout})W_{pumpgout-hextout}} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (28)$$

### 3.5 طراحی جبرانساز تغذیه-مستقیم

ثابت زمانی در ماتریس تابع انتقال را در نظر بگیرید (معادله (4)):

$$\tau = \frac{l \rho_{jout0}}{G_{jout0}} = \frac{l}{v_{jout0}} \quad (29)$$

معادله (29)، زمان تاخیر بزرگ در مولفه های سیستم خنک کننده را نشان می دهد، بنابراین یک طرح تغذیه مستقیم برای بهبود پاسخ دینامیک سیستم کنترل اتخاذ شده است:



شکل ۹. پاسخ سیستم به تغییر توان راکتور (30٪ از RFP) با PI و جبرانساز تغذیه مستقیم.

$$FW_{q-airin} = \frac{W_{q-hextout}}{W_{airin-hextout}} \quad (30)$$

$$FW_{q-pumpgout} = \frac{W_{q-hextout}}{W_{pumpgout-hextout}} \quad (31)$$

از نظر تئوری،  $FW_{q-pumpgout}$  و  $FW_{q-airin}$  معین شده توسط معادلات (30) و (31) می‌توانند خطای دما را به دقت حذف نمایند؛ هرچند، تحقق واقعی این مورد به دلیل مرتبه بالا در  $W_{airin-hextout}$ ،  $W_{q-hextout}$ ،

$W_{pumpgout-hextout}$  و  $W_{q-hextout}$  سخت است. یک مولفه پس فاز-پیش فاز را می‌توان به جای

$FW'_{q-pumpgout}$ :  $FW'_{q-airgin}$  معرفی نمود:

$$FW'_{q-airgin} = K_{f1} \frac{1 + T_1 s}{1 + T_2 s} \quad (32)$$

$$FW'_{q-pumpgout} = K_{f2} \frac{1 + T_3 s}{1 + T_4 s} \quad (33)$$

که در آن  $K_{f1}$  و  $K_{f2}$  را می

توان برای حالت پایدار نرخ جریان جرم هوا و دمای خروجی در سمت ثانویه HEX تنظیم نمود.  $T_1$  و  $T_3$  را می‌توان برای بهبود مشخصه دینامیک کنترل تغذیه مستقیم اتخاذ نمود.

بلوک دیاگرام سیستم کنترل دما با PI و جبرانساز تغذیه مستقیم را می‌توان به صورت شکل 8 نشان داد.

#### 4. نتیجه شبیه سازی

برای تایید بازده راهبرد کنترل و توانمندی‌های جبرانساز دما، تغییر مرحله توان هسته توسط Simulink شبیه سازی می‌شود. راکتور ابتدائی در 100 توان کامل نامی (RFP) عمل می‌کند. مراحل توان تا 130 % RFP در

ثانیه اول است. پاسخ  $G_{pumpout}$ :  $T_{coreout}$ ,  $T_{hextout}$ ,  $G_{airgin}$  و  $D_{hexgin-hexout}$  را می‌توان به صورت شکل 9 نشان داد (خطوط قرمز). به عنوان مقایسه، مدل دینامیک راکتور Relap5-HD (2011) نیز در شکل 9 شبیه سازی شده است

(خطوط آبی برلیانی). می‌توان دید که  $T_{hexout}$ ، تحت عمل ثابت می‌ماند ( $D_{hexgin-hexout}$  و  $D_{airgin-hexout}$ )، بر این اساس، فشاردهنده حلقه ثانویه نباید حامل تغییر فشار بزرگی (ماکزیمم نوسان دمایی کمتر از 0.2K است). در حلقه اولیه، دمای خنک کننده، در سطح ایمن است و دارای حاشیه امنیت بالایی است.

## 5. خلاصه

در این کار، یک مدل تابع انتقال بر مبنای قوانین بنیادی جرم و انرژی که فرآیند دینامیک دما و حلقه ثانویه در LFR را ثابت می کند، ساخته می شود. بر اساس مدل تابع انتقال، یک سیستم کنترل دمای خنک کننده برای ثابت نگهداشتن دمای خروجی در سمت ثانویه HEX از طریق روش تحلیل حوزه فرکانسی تحلیل می شود. تحلیل فرکانسی نشان می دهد که سیستم کنترل دما بدون جبرانساز LFR با گردش طبیعی ناپایدار است و دارای بهره های حالت پایدار محدود است. بر این اساس، یک جبرانساز دمای مبتنی بر PI و تغذیه-مستقیم برای بهبود عملکرد سیستم طراحی می شود. برای نشان دادن بازده و عملی بودن جبرانساز دما، شبیه ساز دینامیک سیستم کلی با جبرانساز دما در مورد تغییر گام توان هسته (RFP) از 30٪ انجام می شود. نتیجه شبیه سازی نشان می دهد که دمای خروجی در سمت ثانویه HEX به خوبی کنترل می شود و پارامترهای کلیدی دیگر در گستره مجاز هستند. بنابراین جبرانساز طراحی شده توسط روش حوزه فرکانس دارای توانمندی های کنترل دمای خنک کننده برتر در LFR با چرخش طبیعی است. همچنین نشان می دهد که روش حوزه فرکانس یک ابزار مفید برای مطالعه عملیات و کنترل LFR است.

در کار آینده، دقیق مدل تابع انتقال بر اساس روش اولین اصل از طریق حلقه آزمایشی هیدرولیک-حرارتی LBE تایید خواهد شد.

## References

- Alemberti, A., Smirnov, V., Smith, C.F., et al., 2014. Overview of lead-cooled fast reactor activities. *Prog. Nucl. Energy* 77, 300–307.
- Benjamin, C., 2003. *Automatic Control Systems*. John Wiley & Sons Inc., Hoboken.
- Bianchi, F., Artioli, C., Burn, K.W., et al., 2006. Status and trend of core design activities for heavy metal cooled accelerator driven system. *Energy Convers. Manage.* 47, 2698–2709.
- Cinotti, L., Locatelli, G., AitAbderrahim, H., Monti, S., Benamati, G., Tucek, K., Struwe, D., Orden, A., Corsini, G., Le Carpentier, D., 2008. The ELSY project. In: *Proceedings of International Conference on the Physics of Reactors, PHYSOR'08 'Nuclear Power: A Sustainable Resource'*, Interlaken, Switzerland, 14–19 September 2008.

- Colombo, M., Cammi, A., Memoli, V., et al., 2010. Transfer function modeling of the Lead-cooled Fast Reactor (LFR) dynamics. *Prog. Nucl. Energy* 52, 715–729.
- De Bruyn, D., Maes, D., Mansani, L., Giraud, B., 2007. From MYRRHA to XT-ADS: the design evolution of an experimental ADS system. In: AccApp'07, Pocatello, Idaho, July 29–August 2, 2007.
- Huang, Q., Li, J., Chen, Y., 2004. Study of irradiation effects in China low activation martensitic steel CLAM. *J. Nucl. Mater.* 329, 268–272.
- Huang, Q., Li, C., Wu, Q., Liu, S., Gao, S., Gao, Z., et al., 2011. Progress in development of CLAM steel and fabrication of small TBM in China. *J. Nucl. Mater.* 417, 85–88.
- Orlov, V.V., Filin, A.L., Lopatkin, A.V., Glazov, A.G., Sukhanov, L.P., Volk, V.L., Poluektov, P.P., Ustinov, O.A., Vorontsov, M.T., Leontiev, V.F., Karimov, R.S., 2005. The closed o-site fuel cycle of the BREST reactors. *Prog. Nucl. Energy* 47, 171–177.
- Relap5-HD Software, 2011. GSE Systems Inc.
- Sabharwall, P., Yoo, Y.J., Wu, Q., Sienicki, J.J., 2012. Natural circulation and linear stability analysis for liquid-metal reactors with the effect of fluid axial conduction. *Nucl. Technol.* 173, 301–302.
- SIMULINK Software, 2007. The Math Works Inc.
- Smith, C.F., Halsey, W.G., Brown, N.W., Sienicki, J.J., Motsseytsev, A., Wade, D.C., 2008. SSTAR: the US Lead-cooled Fast Reactor (LFR). *J. Nucl. Mater.* 376, 255–259.
- Wu, Y., 2007. Progress in fusion-driven hybrid system studies in China. *Fusion Eng. Des.* 63–64, 73–80.
- Wu, Y/FDS Team, 2008. Conceptual design of the China fusion power plant FDS-II. *Fusion Eng. Des.* 83, 1683–1689.
- Wu, Y/FDS Team, 2009. Fusion-based hydrogen production reactor and its material selection. *J. Nucl. Mater.* 386–388, 122–126.
- Wu, Y/canFDS Team, 2011. Overview of liquid lithium lead breeder blanket program in China. *Fusion Eng. Des.* 86, 2343–2346.
- Wu, Y., Xie, Z., Fischer, U., 1999. A discrete ordinates nodal method for one-dimensional neutron transport calculation in curvilinear geometries. *Nucl. Sci. Eng.* 133, 350–357.
- Wu, Y., Zhu, X., Zheng, S., et al., 2002. Neutronics analysis of dual-cooled waste transmutation blanket for the FDS. *Fusion Eng. Des.* 63–64, 133–138.
- Wu, Y., Jiang, J., Wang, M., Jin, M./FDS Team, 2011. A fusion-driven subcritical system concept based on viable technologies. *Nucl. Fusion* 51, 103036.
- Wu, Y., Bai, Y., Song, Y., Huang, Q., Zhao, Z., Hu, L., 2016. Development strategy and conceptual design of china lead-based research reactor. *Ann. Nucl. Energy* 87, 511–516.
- Yan, Shoujun, Fang, Huawei, Wang, Pengfei, Sun, Changyi, Zhao, Fuyu, Huang, Hao, 2014. Modeling and control strategy of the China accelerator driven subcritical reactor. *Prog. Nucl. Energy* 71, 179–187.
- Yoshiaki, O., Haruki, M., Mitsuru, U., 2013. Nuclear Reactor Kinetics and Plant Control. Springer, Japan.
- Zrodnikov, A.V., Toshinsky, G.I., Komlev, O.G., Dragunov, Y.G., Stepanov, V.S., Klimov, N.N., Generalov, V.N., Kopytov, I.I., Krushelnitsky, V.N., 2008. Innovative nuclear technology based on modular multi-purpose lead-bismuth cooled fast reactors. *Prog. Nucl. Energy* 50, 170–178.



www.javar...eFa.Com

برای خرید فرمت ورد این ترجمه، بدون واتر مارک، اینجا کلیک نمایید.



این مقاله، از سری مقالات ترجمه شده رایگان سایت ترجمه فا میباشد که با فرمت PDF در اختیار شما عزیزان قرار گرفته است. در صورت تمایل میتوانید با کلیک بر روی دکمه های زیر از سایر مقالات نیز استفاده نمایید:

✓ لیست مقالات ترجمه شده

✓ لیست مقالات ترجمه شده رایگان

✓ لیست جدیدترین مقالات انگلیسی ISI

سایت ترجمه فا؛ مرجع جدیدترین مقالات ترجمه شده از نشریات معتبر خارجی