



## طراحی سیستم تأمین انرژی سیم‌پیچ چنبره‌ای بر پایه ابرخازن به منظور افزایش زمان پلازما در توکامک دماوند

حسین رسولی<sup>۱\*</sup>، امیررضا دارابی<sup>۱</sup>، کریم عباس‌زاده<sup>۲</sup>، حجت بابایی<sup>۱</sup>، امیرحسین معروف‌خانی<sup>۱</sup>  
 ۱. پژوهشکده پلازما و گداحت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران  
 ۲. گروه قدرت، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، صندوق پستی: ۱۳۵۵-۱۶۳۱۵، تهران - ایران

\*Email: hsrasouli@aeoi.org.ir

### مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۳۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۲۱

### چکیده

در این مقاله سیستم تأمین انرژی و تخلیه جریان در سیم‌پیچ چنبره‌ای توکامک دماوند به منظور افزایش زمان میدان‌های مغناطیسی با هدف افزایش زمان ماندگاری پلازما، طراحی و شبیه‌سازی شده است. در حال حاضر در این توکامک جریان سیم‌پیچ چنبره‌ای دارای نیم سیکل سینوسی با مدت زمان ۱۰۰ ms و پیک جریان ۱۲ kA است که میدان مغناطیس تقریباً ۱٫۱ T در مرکز چنبره تولید می‌کند و ناحیه تخت آن در حدود ۲۰ ms می‌باشد که برای تشکیل و محصورسازی پلازما استفاده می‌گردد. با هدف ارتقاء توکامک دماوند به منظور افزایش مدت زمان ماندگاری پلازما به ۲۰۰ ms، ضروری است که سیستم‌های تأمین انرژی و کنترل مربوط به جریان سیم‌پیچ‌های قطبی و چنبره‌ای جدید طراحی و ارتقاء یابد. برای رسیدن به هدف مذکور، در این مقاله سیستم تأمین انرژی اصلی بر پایه منابع انرژی ذخیره‌ساز ابر خازن با ظرفیت ۲۱F، ولتاژ تحمل ۹۰۰V و چیدمان ۷ شاخه سری، ۸ شاخه موازی طراحی شده است. همچنین جهت تأمین و تثبیت جریان سیم‌پیچ چنبره‌ای، مبدل چاپر با ۷ ماژول موازی به همراه سیستم کنترل حلقه بسته با کنترل‌کننده هیستریزس طراحی و شبیه‌سازی شده است. سیستم کلی قابلیت تأمین و تثبیت میدان مغناطیسی از محدوده ۰٫۷ تا ۱٫۲ تسلا با ریبیل کم‌تر از ۰٫۲٪ و مدت زمان ۲۰۰ ms برای ناحیه تخت دارد. همچنین سیستم شارژ بانک ابر خازنی بر اساس مبدل یکسوساز ۱۲ پالسه و مبدل باک با روش جریان ثابت، طراحی و شبیه‌سازی شده است که نتایج مطلوبی را حاصل کرده است.

**کلیدواژه‌ها:** سیم‌پیچ چنبره‌ای، توکامک دماوند، مبدل قدرت، ابرخازن، پلازما

## Supercapacitors Based Power Supply Design for Toroidal Field Coil of Upgrade Damavand Tokamak

H. Rasouli<sup>1\*</sup>, A.R. Darabi<sup>1</sup>, K. Abbaszadeh<sup>2</sup>, H. Babae<sup>1</sup>, A.H. Maroufkhani<sup>1</sup>

1. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O. Box: 14155-1339, Tehran - Iran  
 2. Faculty of Electrical Engineering, K.N. Toosi University of Technology (KNTU), P.O.BOX: 16315-1355, Tehran, Iran

### Research Article

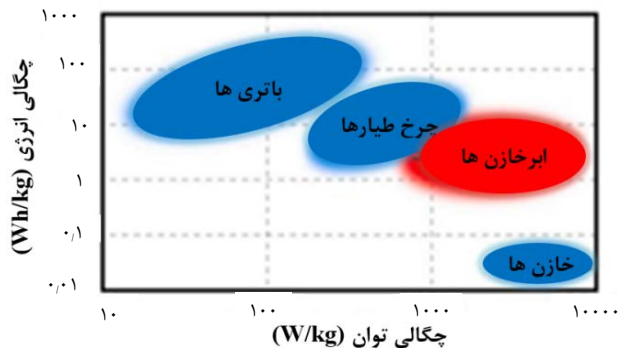
Received 20.1.2022 Accepted 12.3.2022

### Abstract

In this study, the current discharge and the power supply system of toroidal field (TF) coils of Damavand tokamak have been designed and simulated to increase the magnetic field time and consequently the plasma duration. Currently, the TF coil current used to form and confine plasma has a sinusoidal half-cycle waveform with a duration of 100ms and a current peak of 12kA which produces a 1.1T magnetic field at the center of the chamber and its flat-top area is about 20ms. With the aim of upgrading Damavand tokamak, in order to increase the plasma duration to 200ms, it is necessary to upgrade the energy supply system and control system of toroidal and poloidal field coil currents. For this purpose, in this paper, the main power supply system has been designed based on super-capacitors with a capacitance of 21F, voltage of 900V, and topology of series-parallel (7\*8). Also, to supply and stabilization of TF current, the chopper converter with seven parallel modules with the closed-loop control system with hysteresis controller has been designed and simulated. The general system is capable of supplying and stabilizing the magnetic field from the range of 0.7 to 1.2 Tesla with a ripple of less than 0.2% and a duration of 200ms for the flat area. Also, the charging system of super-capacitors has been designed and simulated using the 12-pulse rectifier converter and the buck converter with the constant current method, which has achieved desirable results.

**Keywords:** Toroidal field coil, Damavand tokamak, Power convertor, Supercapacitors, Plasma





۱. مقدمه

به علت عملکرد پالسی توکامک‌ها، اغلب آن‌ها از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی به عنوان منبع تغذیه استفاده می‌کنند. در توکامک‌های مقیاس بزرگ معمولاً از چرخ‌طیارها استفاده می‌شود [۱]. توکامک‌های متوسط و کوچک می‌توانند به طور مستقیم به شبکه برق سراسری متصل شوند. اما با توسعه ابرخازن‌ها به عنوان سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی برای کاربردهای پالسی، استفاده از آن‌ها کارا تر و اقتصادی‌تر از شبکه است [۲]. حتی توکامک‌های بزرگ نیز شروع به برنامه‌ریزی برای جایگزینی چرخ‌طیارها با ابرخازن‌ها کرده‌اند [۳].

ابرخازن‌ها دارای چگالی توان بالا بوده و به علت این ویژگی، استفاده از آن‌ها برای تأمین جریان در سیم‌پیچ‌های توکامک رو به گسترش است. شکل ۱ مقایسه بین ابرخازن‌ها، چرخ‌طیارها، باتری‌های معمولی و خازن‌های استاندارد را نشان می‌دهد. ابرخازن‌ها چگالی توان بالاتری (۱۰-۵ kW/kg) نسبت به باتری لیتیومی-یونی دارند اما به طور چشمگیری دارای چگالی انرژی پایین‌تری از آن‌ها هستند. طول عمر آن‌ها تقریباً دو برابر طول عمر باتری است. ابرخازن‌ها هم‌چنین به علت ترکیب مواد ساختار طراحی آن دارای مقاومت سری معادل پایین هستند. این ویژگی‌ها منجر به کارایی بیشتر آن‌ها به دلیل افزایش ظرفیت، افزایش جریان شارژ و دشارژ و کاهش تلفات گرمایی می‌شود [۴، ۵].

در توکامک، نمی‌توان ابرخازن‌ها را به طور مستقیم به سیم‌پیچ‌ها متصل کرد و نیاز به مبدل مناسب است تا بتوان جریان لازم را با یک روش کنترل شده تأمین نمود. برای تشکیل پلازما و محصورسازی آن، ریپل<sup>۲</sup> کلی میدان مغناطیسی چنبره‌ای<sup>۳</sup> (TF) باید بسیار ناچیز باشد. از آن‌جا که مقدار آن وابسته به ریپل جریان سیم‌پیچ میدان چنبره‌ای است، یک مبدل قدرت مناسب می‌تواند جریان با ریپل محدود را کنترل کند. استفاده از ماژول‌های ابرخازنی و مبدل مربوطه به همراه سیستم شارژ بانک ابرخازنی به منظور تحریک سیم‌پیچ چنبره‌ای در توکامک ارتقاء یافته ASDEX ارایه شده است [۳].

شکل ۱. مقایسه بین ابرخازن‌ها، باتری‌ها و خازن‌های معمولی بر حسب چگالی توان و انرژی [۲].

تغذیه سیم‌پیچ چنبره‌ای در توکامک<sup>۴</sup> SST1 بر مبنای مبدل یکسوساز ۱۲ پالسه بر اساس تریستور<sup>۵</sup> می‌باشد و با کنترل زاویه آتش<sup>۶</sup>، پروفایل جریان مورد نیاز تولید می‌گردد [۶]. در توکامک ST۲۵، تأمین انرژی سیم‌پیچ چنبره‌ای با بانک‌های ابرخازنی طراحی شده است و در آن کنترل جریان سیم‌پیچ از طریق مبدل چاپر<sup>۷</sup> کاهنده با فیدبک جریان و کنترل عرض پالس IGBT<sup>۸</sup>ها صورت می‌گیرد [۷]. برای هر کدام از سیم‌پیچ‌های چنبره‌ای و قطبی در توکامک SMART، سیستم تأمین انرژی بر پایه ماژول‌های ابرخازنی و مبدل‌های قدرت H-Bridge بر پایه IGBTها طراحی شده است. در این توکامک، جریان به وسیله ماژول‌های ابرخازنی برای مدت زمان ۱ ثانیه فراهم می‌شود [۸، ۹]. منابع تغذیه در توکامک Proto-Sphera بر اساس مبدل‌های H-Bridge و ابرخازن‌ها طراحی و شبیه‌سازی شده است. هم‌چنین این نوع طراحی‌ها برای عملکردهای طولانی مدت در مراجع [۵، ۱۰، ۱۱] ارایه شده است. برای اولین بار استفاده عملی از ماژول‌های ابرخازنی در توکامک NORTH<sup>۹</sup> گزارش شده که در آن برای تخلیه ۲۰ ثانیه، ۴ ماژول ابرخازنی ۱۲۵V شرکت ماکسول به عنوان بانک خازنی و یک مبدل چاپر بر پایه IGBT برای تحریک سیم‌پیچ چنبره‌ای استفاده شده است [۱۲].

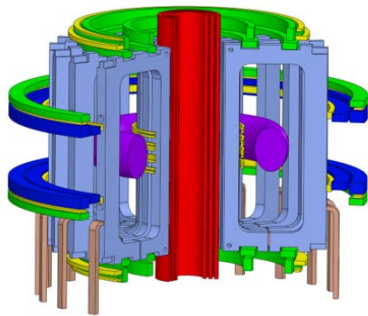
در توکامک دماوند جریان پلازما با بیشینه جریانی در حدود ۴۰ kA و در مدت زمان ۲۰ ms تولید می‌شود [۱۳]. سیستم تأمین انرژی این توکامک مربوط به چند دهه قبل می‌باشد که شامل بانک‌های خازنی ولتاژ بالا و تخلیه بدون

4. Steamy State Superconducting Tokamak  
5. Thyristor  
6. Firing Angle  
7. Chopper  
8. Insulated-Gate Bipolar Transistor  
9. NORdic Tokamak

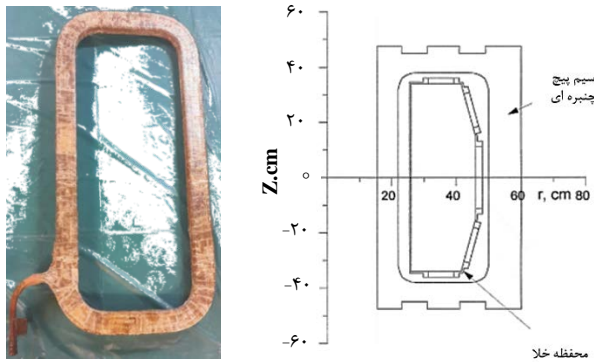
1. Flywheel  
2. Ripple  
3. Toroidal Field (TF)



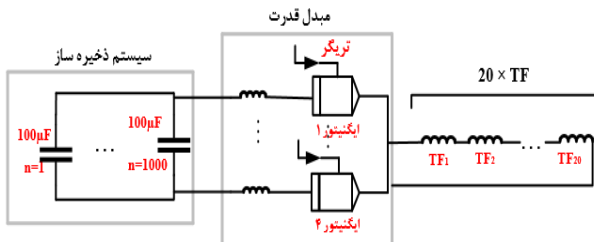
نمای کلی از سیستم تأمین انرژی سیم پیچ چنبره‌ای در شکل ۴ نشان داده شده است. انرژی ذخیره شده در بانک خازنی، از طریق ۴ سوئیچ ایگنیترون موازی شده بدون کنترل در سیم پیچ تخلیه می‌گردد. جریان نیم سیکل سینوسی در مدت ۱۰۰ms ایجاد می‌کند که برای حالت تجربی، نمودار جریانی آن ( $I_T$ ) در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به آن، ناحیه تخت جریان  $I_T$  در حدود ۲۰ms است و ۳۸ms بعد از شروع به بیشینه خود می‌رسد. در جدول ۱ مشخصات سیم پیچ چنبره‌ای و بانک خازنی مربوطه ارائه شده است.



شکل ۲. سطح مقطع توکامک دماوند [۱۴].



شکل ۳. یک پیچه از سیم پیچ میدان چنبره‌ای در توکامک دماوند [۱۴].



شکل ۴. نمای کلی از منبع تأمین انرژی و تخلیه جریان در TF.

کنترل جریان در سیم پیچ‌ها از طریق سوئیچ ایگنیترون<sup>۱</sup> است. هدف از ارتقاء توکامک دماوند، افزایش مدت زمان حضور پلازما به ۲۰۰ms، با ثابت ماندن محفظه خلأ و سیم پیچ‌های مولد میدان می‌باشد. برای افزایش مدت زمان ماندگاری پلازما، ضروری است پارامترهای مدت زمان تخلیه، شکل و شدت جریان سیم پیچ چنبره‌ای بر اساس قیود مطرح در این ماشین تعیین و سپس منبع انرژی لازم و مبدل قدرت آن طراحی گردد. در این مقاله، ساختار فعلی سیستم تأمین انرژی و تخلیه جریان سیم پیچ چنبره‌ای در بخش ۲ بیان می‌گردد. بخش ۳ مربوط به محاسبه ظرفیت بانک‌های خازنی سیم پیچ چنبره‌ای توکامک ارتقاء یافته خواهد بود. در بخش ۴، طراحی و شبیه‌سازی مبدل‌های قدرت و سیستم کنترل جریان مبدل بیان شده است. در بخش ۵، طراحی سیستم شارژ ابر خازن‌ها و در نهایت در بخش ۶، نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

## ۲. مشخصات سیم پیچ چنبره‌ای و تأمین انرژی آن

سیستم مغناطیسی توکامک دماوند شامل سیم پیچ‌های مولد میدان چنبره‌ای<sup>۲</sup> (TFC) و پیچه‌های مولد میدان قطبی هستند. مولد میدان مغناطیسی قطبی از پیچه مرکزی<sup>۳</sup> (CS) و سیم پیچ‌های میدان قطبی<sup>۴</sup> (PFC) نظیر سیم پیچ‌های تعادلی، کنترلی و کشیدگی تشکیل شده است. شکل ۲ نمای سه بعدی پیچه‌ها و سطح مقطع توکامک دماوند را نشان می‌دهد. میدان مغناطیسی چنبره‌ای در واقع اصلی‌ترین و مهم‌ترین میدان مغناطیسی در توکامک می‌باشد. سیم پیچ مولد میدان مغناطیسی چنبره‌ای خود متشکل از سیم پیچ‌های کوچکی است که هر کدام دارای تعداد دور معینی بوده و به صورت سری متصل شده‌اند. وظیفه آن‌ها تولید میدان مغناطیسی (BT) محصورکننده در راستای محفظه است.

در توکامک دماوند سیم پیچ چنبره‌ای از ۲۰ پیچه مجزا تشکیل شده که هر کدام از آن‌ها دارای ۸ دور هستند. شکل ۳، یک عدد از این پیچه و همچنین نقشه آن را نشان می‌دهد. هر کدام از این پیچه‌ها دارای مقاومت  $2.5\text{ m}\Omega$  و القاییدگی  $250\text{ }\mu\text{H}$  هستند و تمامی پیچه‌ها با یکدیگر به صورت سری متصل می‌شوند. مجموعه این سیم پیچ با در نظر گرفتن مسیر اتصال از بانک خازنی، دارای مقاومت  $53.5\text{ m}\Omega$  و اندوکتانس  $5\text{ mH}$  است. با تأمین انرژی از طریق بانک خازنی با ظرفیت  $210\text{ mF}$  و ولتاژ اولیه حدود  $2\text{ kV}$ ، با عبور جریانی در حدود  $13\text{ kA}$  میدان مغناطیسی در حدود  $1.2\text{ T}$  تولید می‌گردد.

1. Ignitron Switch
2. Toroidal Field Coil (TFC)
3. Central Solenoid
4. Poloidal Field

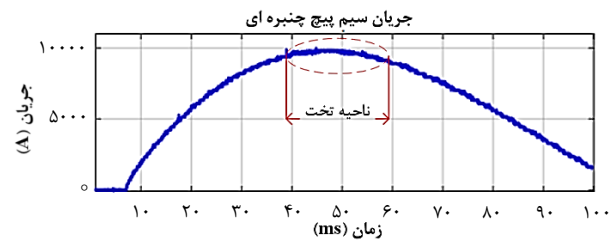


ژولی با تحریک نیم سیکل سینوسی در مدت ۱ ثانیه برای TF بررسی شده است (ناحیه تخت ۲۰۰ ms برای محصورسازی استفاده می‌شود) [۱۴]. گرمایش ژولی مشکلاتی در موفقیت شات‌های متوالی ایجاد خواهد کرد. برای این منظور لازم است یک سیستم خنک‌سازی سیم‌پیچ با آب طراحی شود تا اثرات گرمایشی و تنش ناشی از آن را خنثی کند. دمای سیم‌پیچ بعد از ۴ شات متوالی با طول پالس ۱ ثانیه، تا ۴۳°C بالا می‌رود خنک‌سازی آن با آب دمای ۲۰°C از طریق کانال‌های خنک‌کننده در حدود ۳ دقیقه طول خواهد کشید. بنابراین برای این-که بتوان از ساختار موجود سیم‌پیچ چنبره‌ای برای عملکرد پالس طولانی استفاده کرد، لازم است یک فاصله زمانی ۴ دقیقه جهت خنک‌سازی و کاهش دمای سیم‌پیچ در بین شات‌ها در نظر گرفته شود [۱۴].

محدودیت‌های عملیاتی اساس شکل موج جریان مورد نیاز در سیم‌پیچ چنبره‌ای است. برای ایجاد میدان مغناطیسی مطلوب، شکل موج جریان لازم در شکل ۶ نشان داده شده است. قیدهای مربوط به شکل ۶ و شدت جریان سیم‌پیچ چنبره‌ای در توکامک دماوند عبارتند از:

۱. قید پیش یونش از طریق مگنترون: فرکانس مگنترون در این توکامک ۱۵ GHz است که معادل فرکانس جذب سیکلوترونی الکترون‌ها در میدان ثابت  $B_T = 0.5$  T می‌باشد، این میدان در جریان حدود  $I_T = 6$  kA ایجاد می‌گردد. از طرف دیگر، فاصله زمانی پیش یونش (اعمال مگنترون) تا زمان شروع میدان  $B_T$  (یا شروع جریان سیم‌پیچ مرکزی  $(I_i)$ ) محدود به ۲۲ ms است (شکل ۶).
۲. قید دیگر، قابلیت تنظیم میدان  $B_T$  در محدوده  $0.7T < B_T < 1.2T$  برای ناحیه تخت می‌باشد. (شکل ۶).

۳. محدودیت تغییرات ریپل جریان در حدود  $\Delta i = 50$  A در ناحیه تخت: در ناحیه تخت جریان،  $B_T$  می‌بایست تقریباً ثابت باشد، اما در واقعیت به دلیل کنترل تثبیت جریان به همراه یک ریپل می‌باشد. تغییرات میدان مغناطیسی در ناحیه تخت با در نظر گرفتن ۰.۲٪ میدان اصلی در حدود  $0.1002$  T می‌شود که معادل جریان در حدود ۲۵ A است. لذا ریپل جریان در ناحیه تخت سیم‌پیچ چنبره‌ای  $\Delta i = 50$  A خواهد بود که از طریق کنترل هیستریزس حاصل می‌شود. ریپل جریان در طراحی توکامک SMART کم‌تر از ۱٪ و در طراحی ASDEX در حدود ۰.۱٪ است [۳، ۸].



شکل ۵. نمودار جریان واقعی ( $I_T$ ) در شرایط فعلی [۱۳].

جدول ۱. مشخصات سیم‌پیچ چنبره‌ای و بانک خازنی مربوطه [۱۴]

مشخصات	مقادیر
تعداد کوئل	۲۰
تعداد دور در هر کوئل	۸
اندوکتانس کل	۵ mH
مقاومت الکتریکی	۵۳.۵ mΩ
جنس پیچ‌ها	مس-توخالی
نحوه خنک‌سازی	آب
بیشینه جریان	۱۳ kA
ignitron	IRT-50980 (IPT-50980)
مدت زمان تخلیه	۱۰۰ ms
مشخصات خازن‌ها	۱۰۰ μF/۵ kV
مشخصات بانک خازنی	۲۱۰ mF/۲ kV

### ۳. طراحی بانک خازنی برای پیچ TF توکامک ارتقاء یافته دماوند

با توجه به مطالب بیان شده در بخش ۲، یکی از اهداف ارتقاء قابلیت تحریک سیم‌پیچ TF جهت تولید میدان مغناطیسی ثابت در محدوده قابل تنظیم  $0.7T < B_T < 1.2T$  می‌باشد. جریان مورد نیاز سیم‌پیچ از قانون آمپر به دست می‌آید و وابسته به شعاع اصلی پلاسما ( $R_p$ ), میدان چنبره‌ای ( $B_T$ ), تعداد دورهای سیم‌پیچ چنبره‌ای ( $N_T$ ) و گذردهی مغناطیسی ( $\mu_0$ ) است:

$$I_T = \frac{2\pi R_p B_T}{\mu_0 N_T} \quad (1)$$

بر اساس رابطه (۱)، جریان ثابت و قابل کنترل در محدوده  $8kA < I_T < 13kA$  برای مدت زمان حداقل ۲۰۰ ms لازم است. برای افزایش مدت زمان جریان و کنترل شدت آن از ماژول‌های ابرخازنی استفاده می‌شود و می‌توان با به‌کارگیری مبدل چارپ DC/DC مدت زمان تخلیه و دامنه جریان تحریک سیم‌پیچ را کنترل نمود.

شایان ذکر است، با توجه به این‌که ساختار سیم‌پیچ بدون تغییر باقی می‌ماند، این ساختار باید توانایی تحمل گرمایش ژولی ناشی از عملکرد پالس ۲۰۰ ms را داشته باشد. گرمایش



STB و ولتاژ مربوطه بر اساس پیک جریان ۱۳kA با عرض پالس ۲۵۰ms محاسبه می‌شود.

حداکثر تغییرات جریان ( $\Delta i = 50A$ ) در ناحیه تخت با به‌کارگیری سیستم کنترل جریان در مبدل فراهم می‌شود. با این روش، تغییرات ریپل جریان محدود شده و قید ۳ برآورده خواهد شد.

### ۱.۳ طراحی بانک خازنی سریع (FTB)

برای طراحی بانک خازنی FTB لازم است بیشینه و کمینه جریان به ترتیب ۱۳kA و ۸kA باشد هم‌چنین به دلیل پدیده زمان پویش و باز ترکیب یونیزاسیون، ضروری است مدت زمانی که از ۶kA تا بیشینه جریان تنظیمی طول می‌کشد، کم‌تر از ۲۰ms باشد. اگر مدت زمان رسیدن به بیشینه جریان ۳۸ms در نظر گرفته شود در این صورت شرط فوق برقرار می‌شود. طراحی ولتاژ و ظرفیت بانک خازنی سریع ( $C_f$ ) بر اساس روابط مداری شکل ۷ در ناحیه میرایی  $0 < \zeta_f \leq 1$  صورت می‌گیرد.

$$I_T(s) = \frac{\frac{V_f}{L_T}}{S^2 + \frac{R_T}{L_T}S + \frac{1}{L_T C_f}} = \frac{K \omega_{nf}^2}{S^2 + 2\zeta_f \omega_{nf} S + \omega_{nf}^2}$$

$$K = \frac{V_f}{L_T \omega_{nf}^2}$$

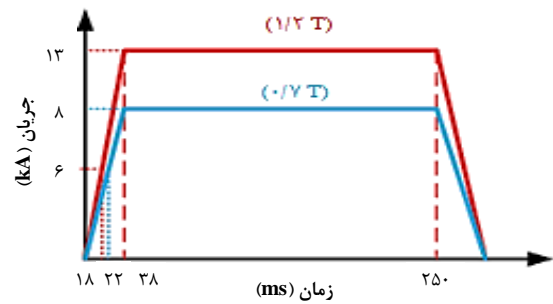
$$I_T = \frac{V_f}{L_T \omega_{nf}} \frac{e^{(-\omega_{nf} \zeta_f t)}}{\sqrt{1 - \zeta_f^2}} \text{Sin}(\omega_{nf} \sqrt{1 - \zeta_f^2} t) \quad (2)$$

که در آن،  $R_T$  و  $L_T$  به ترتیب مقاومت و اندوکتانس کل سیم‌پیچ چنبره‌ای،  $I_T$  جریان سیم‌پیچ،  $C_f$  ظرفیت خازن،  $V_f$  ولتاژ اولیه بانک خازنی است.  $\omega_{nf}$  و  $\zeta_f$  نیز به ترتیب فرکانس طبیعی و میرایی هستند. با در نظر گرفتن  $I_{max}$  به عنوان حداکثر جریان و  $t_p$  زمان رسیدن به آن، ظرفیت بانک خازنی سریع  $C_f$  را می‌توان به صورت رابطه ۳ محاسبه کرد [۱۵].

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_{nf} \sqrt{1 - \zeta_f^2}}, \quad \omega_{nf} = \frac{1}{\sqrt{L_T C_f}}$$

$$\zeta_f = \frac{R_T}{2} \sqrt{\frac{C_f}{L_T}} \Rightarrow C_f = \frac{1}{\left(\frac{L_T \pi^2}{t_p^2} + \frac{R_T^2}{4L_T}\right)} \quad (3)$$

در ادامه با در نظر گرفتن حداکثر جریان، می‌توان ولتاژ بانک خازنی را محاسبه نمود.



شکل ۶. نمودار شکل جریان لازم برای سیم‌پیچ TF (رنگ قرمز برای تخلیه ۱۳ kA (1/2 T) و رنگ آبی برای تخلیه ۸ kA (0/7 T)).

با توجه به قید ۱، در صورت استفاده از یک نوع بانک خازنی و افزایش ظرفیت آن مشخص می‌شود که ولتاژ بانک ابرخازنی باید در حدود ۲ kV باشد تا شرط کوتاه‌ترین فاصله زمانی مابین میدان ۰/۵T و ۱/۲ T را برآورده سازد. از طرفی در تکنولوژی حال حاضر، محدودیت سری‌سازی ابرخازن‌ها، حداکثر ۱/۵ kV است. هم‌چنین، ماژول‌های ابر خازنی متعارف برای جریان در حد کیلوآمپر، ولتاژی کم‌تر از ۲۰۰V دارند و اگر از چیدمان سری و موازی این نوع ماژول‌ها استفاده شود تعداد ماژول‌های مورد نیاز بسیار زیاد خواهد بود که طبیعتاً هزینه و پیچیدگی زیادی به همراه دارد.

یکی از راه‌حل‌های عملی و ممکن استفاده از بانک خازنی معمولی با ظرفیت کم و ولتاژ بالا به عنوان بانک خازنی سریع چنبره‌ای<sup>۱</sup> (FTB) برای رسیدن به پیک جریان ثابت با مدت زمان حدود ۳۸ms می‌باشد و در ادامه تخلیه جریان، به‌کارگیری بانک ابرخازنی با ظرفیت زیاد و ولتاژ پایین، به عنوان بانک ابرخازنی کند چنبره‌ای<sup>۲</sup> (STB) از زمان ۳۸ms تا حدود ۲۵۰ms با جریان قابل کنترل و ثابت در محدوده  $8kA < I_T \leq 13kA$  می‌باشد. بنابراین برای ایجاد  $B_T$  قابل تنظیم و حصول قید پیش یونش در زمان متغییر و قابل تنظیم برای جریان ۶kA، از دو نوع بانک خازنی سریع (موجود) و بانک خازنی آهسته استفاده می‌شود که باید ظرفیت و ولتاژ آن‌ها محاسبه گردد.

با توجه به قید ۲، برای حصول میدان قابل تنظیم لازم است، سیم‌پیچ چنبره‌ای از طریق بانک ابر خازنی STB و مبدل چاپر DC/DC تحریک گردد که جریانی در محدوده  $8kA < I_T \leq 13kA$  در سیم‌پیچ چنبره‌ای لازم خواهد بود. ظرفیت بانک TFB و ولتاژ مربوطه بر اساس شیب جریان لازم برای ایجاد میدان ۰/۵T، هم‌چنین ظرفیت بانک ابر خازنی

1. Fast Toroidal Bank (FTB)
2. Slow Toroidal Bank (STB)



مطابق تبدیل لاپلاس روابط مداری شکل ۸ به صورت رابطه ۵ است.

$$I_T(s) = \frac{\frac{V_{.s}}{L_T} + S I_{.s}}{S^2 + \frac{R_T}{L_T} S + \frac{1}{L_T C_s}} \quad (5)$$

با توجه به تبدیل لاپلاس معکوس رابطه ۵، جریان در حوزه زمان به صورت رابطه ۶ خواهد بود.

$$I_T(t) = e^{-\frac{R_T}{L_T} t} I_{.s} \left( \cosh \left[ \frac{\sqrt{-4L_T + C_s R_T^2} t}{2\sqrt{C_s L_T}} \right] + \frac{\sqrt{C_s} (-I_{.s} R_T + 2V_{.s}) \sinh \left[ \frac{\sqrt{-4L_T + C_s R_T^2} t}{2\sqrt{C_s L_T}} \right]}{I_{.s} \sqrt{-4L_T + C_s R_T^2}} \right) \quad (6)$$

در ادامه برای محاسبه ظرفیت بانک STB از روش فرکانس طبیعی نامیرا استفاده می‌شود. در این حالت فرکانس طبیعی مدار  $\omega_s = \frac{2\pi}{T} = \frac{1}{\sqrt{L_T C_s}}$  است. در ادامه باید مقدار  $T$

(یک دوره از فرکانس نامیرا) را محاسبه کرد، با توجه به این که در بانک‌های خازنی موجود برای سیم‌پیچ چنبره‌ای مدت زمان ناحیه تخت  $20\text{ms}$  و مدت زمان کل  $(T/2)$  تخلیه  $100\text{ms}$  است، با در نظر گرفتن ناحیه تخت معادل  $200\text{ms}$ ، مدت زمان تخلیه  $(T/2)$  معادل  $1$  ثانیه خواهد شد. بنابراین با معلوم بودن  $L_T$  و  $T=2$  پارامتر مجهول ظرفیت خازن برابر  $21F$  محاسبه می‌شود.

با در نظر گرفتن  $C_s=21F$  و با فرض جریان اولیه در دو حالت  $13\text{kA}$  و  $8\text{kA}$ ، بیشینه جریان سیم‌پیچ و مقدار ولتاژ اولیه بانک STB مطابق رابطه ۶ در جدول ۳ ارائه شده است.

برای حصول این مقادیر می‌توان از ماژول‌های یکسان ابرخازنی و سری و موازی‌سازی آن‌ها بهره گرفت. در این طراحی از ماژول‌های ابرخازنی BMO0063P125B08 شرکت ماکسول (دارای ظرفیت  $63F$  و ولتاژ  $125V$  با حداکثر جریان پیوسته  $2\text{kA}$ ) استفاده می‌شود [۱۶]. با توجه به پارامترهای ماژول فوق، باید از مجموعه سری و موازی  $n=8$  و  $m=7$  مطابق شکل ۹ استفاده نمود. در این صورت، مشخصات بانک STB، دارای ظرفیت  $72F$  با تحمل حداکثر ولتاژ، جریان  $875V$  و  $16\text{kA}$  و متشکل از  $56$  عدد ماژول ابرخازن خواهد بود.

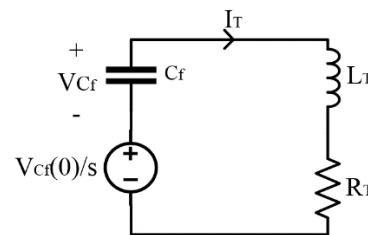
$$I_{\max} = \frac{V_f}{L_T \omega_{nf}} e^{[-\frac{\zeta_f}{\sqrt{1-\zeta_f^2}} \text{Arctan}(\frac{\sqrt{1-\zeta_f^2}}{\zeta_f})]} \quad (4)$$

$$V_f = I_{\max} L_T \omega_{nf} e^{[+\frac{\zeta_f}{\sqrt{1-\zeta_f^2}} \text{Arctan}(\frac{\sqrt{1-\zeta_f^2}}{\zeta_f})]}$$

با توجه به معلوم بودن پارامترهای الکتریکی سیم‌پیچ، از روابط ۳ و ۴ ظرفیت بانک خازنی سریع و ولتاژ اولیه آن برای جریان‌های بیشینه و کمینه تعیین می‌شود که مقادیر آن برای هر یک از جریان‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. قابل ذکر است که با در نظر گرفتن میدان مطلوب در بازه  $0.7 < B_T \leq 1.2T$  و به تناسب آن مطابق با رابطه ۱ جریان مورد نیاز مشخص و در نهایت با توجه به رابطه ۴ ولتاژ تنظیمی بانک خازنی  $C_f$  تعیین می‌گردد. با توجه به جدول ۲ تعداد خازن به صورت موازی برای بانک FTB مورد نیاز است.

### ۲.۳ طراحی بانک خازنی آهسته (STB)

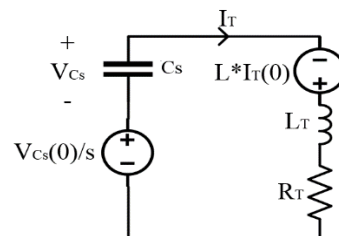
برای طراحی بانک STB لازم است جریان اولیه سیم‌پیچ برابر جریان خروجی بانک FTB در نظر گرفته شود. مدار ساده شده و معادل تخلیه جریان سیم‌پیچ چنبره‌ای پس از روشن شدن سوئیچ بانک STB ( $C_s$ ) در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۷. مدار تخلیه RLC با جریان اولیه صفر و ولتاژ اولیه بانک خازنی.

جدول ۲. مشخصات بانک FTB برای تنظیم پیک جریانی  $8\text{kA}$  و  $13\text{kA}$

پارامتر	ولتاژ شارژ $(V_f)$	ظرفیت بانک خازنی $(C_f)$	برای جریان مطلوب
$\xi_f$	$3.1\text{ kV}$	$127.8\text{ mF}$	$13\text{ kA}$
$\xi_f$	$1.918\text{ kV}$	$127.8\text{ mF}$	$8\text{ kA}$



شکل ۸. مدار معادل تخلیه بانک STB با شرایط اولیه جریان سیم‌پیچ چنبره‌ای.

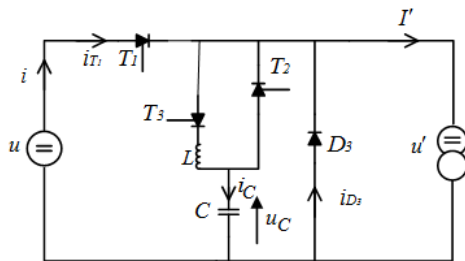


بانک خازنی STB از طریق مبدل قدرت به صورت کنترل شده در سیم پیچ TF تخلیه می‌گردد. برای انجام این کار به یک مبدل با تحمل ولتاژ و جریان به ترتیب ۹۰۰V و ۱۳kA نیاز است.

با توجه به جریان بالای سیم پیچ، لازم است از ماژول‌های موازی در طراحی مبدل استفاده کنیم. با در نظر گرفتن محدودیت فرکانس و دامنه ریپل در جریان خروجی، بهترین انتخاب برای توپولوژی مبدل سیم پیچ چنبره‌ای، مبدل چاپری بر پایه تریستور است (شکل ۱۰)، زیرا با توجه به اندوکتانس TF و ولتاژ بانک STB، فرکانس کلیدزنی کم‌تر خواهد بود که یکی از اهداف این طراحی است.

با در نظر گرفتن این نتایج، پارامترهای اولیه لازم برای طراحی مبدل در جدول ۴ جمع‌بندی شده است.

در ادامه برای حداکثر جریان و ولتاژ ۱۶kA و ۲kV در ماژول‌های مبدل طراحی و سوییچ‌ها انتخاب می‌شوند. با در نظر گرفتن شکل ۱۰ و مشخصات فنی تریستورها از تریستور KK2500/20-22 برای  $T_1$  و  $T_2$  و تریستور KK500/12-18 برای  $T_3$  استفاده می‌شود برای  $T_3$  و دیود ZK2000/36-45 برای  $D_3$  استفاده می‌شود [۱۷]. با توجه به حداکثر جریان و ولتاژ  $T_1$  (۲.۵kA و ۲kV)، ۷ ماژول موازی از مدار چاپر شکل ۱۰، بهینه خواهد بود.



شکل ۱۰. مدار چاپر DC/DC کاهنده [۱۵].

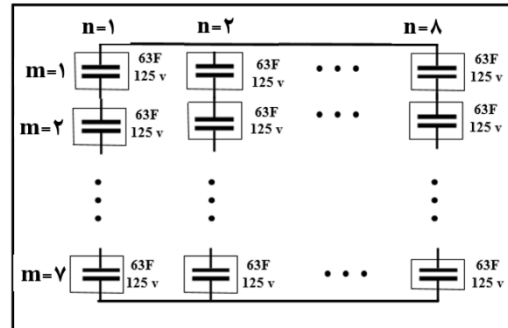
جدول ۴. مشخصات لازم برای طراحی مبدل تخلیه

مقادیر	مشخصات	
۷۲	ظرفیت (F)	بانک خازنی آهسته
۸۷۵	حداکثر ولتاژ شارژ (V)	
۱,۶۲۵	حداکثر جریان یک ماژول (kA)	
۳۰۰	مدت زمان تخلیه (ms)	
۵۶	تعداد ماژول	
۱۴۷,۸	ظرفیت (mF)	بانک خازنی سریع
۵	حداکثر ولتاژ شارژ (kV)	
۸۸	حداکثر جریان یک خازن (A)	
۳۸	مدت زمان تخلیه (ms)	
۱۴۷,۸	تعداد خازن	پروفایل جریان
$۳,۴۲ \times 10^{-5}$	حداکثر شیب (A/s)	
$\pm 25$	حداکثر ریپل جریان (A)	
یکسویه (+)	-	نوع جریان

جدول ۳. مشخصات بانک STB برای تنظیم پیک جریانی ۸kA و ۱۳kA

بیشینه جریان حاصله	ولتاژ اولیه لازم برای	برای جریان مطلوب
۱۳,۲ kA	۷۲۰ V	۱۳ kA
۸,۲ kA	۴۳۰ V	۸ kA

بانک خازنی STB



شکل ۹. نحوه سری و موازی سازی ماژول‌های ابرخازنی STB.

در بخش قبل، ظرفیت بانک STB برابر ۷۲F حاصل شد در حالی که طبق محاسبه ۲۱F لازم بود. برای رسیدن به ظرفیت ۲۱F، ساختار سری با مجموعه سری و موازی  $n=8$  و  $m=7$  متشکل از  $3 \times 56$  ماژول لازم است که بنا به استدلال زیر بهینه خواهد بود.

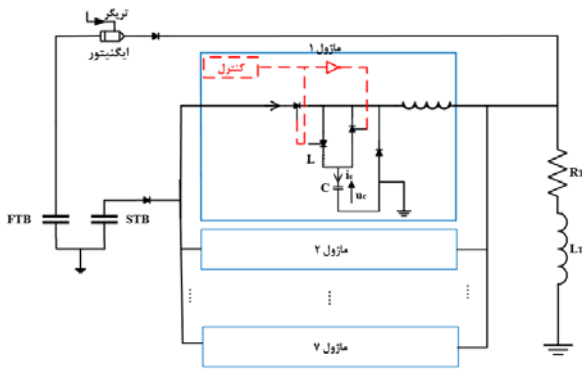
در صورتی که در رابطه ۶، بیشینه جریان به ترتیب ۸,۲kA و ۱۳,۲kA به عنوان پارامترهای معلوم، ولتاژ اولیه و ظرفیت خازن به عنوان مقادیر مجهول در نظر گرفته شوند، به ترتیب مقادیر ولتاژ ۴۰۶V و ۷۱۰V و ظرفیت ۴۴۲F و ۶۵۴F حاصل می‌شود. دلیل این‌که این ولتاژها تقریباً برابر حالت قبل شده و مقدار ظرفیت خازن افزایش یافته، این است که با توجه به رابطه ساده شده ۷، حتی اگر ظرفیت خازن‌ها برابر بی‌نهایت در نظر گرفته شود، در این صورت برای جریان ۸,۲kA و ۱۳,۲kA به ترتیب ولتاژ ۴۳۸V و ۶۹۵V در بانک ابرخازن نیاز است. بنابراین ظرفیت ۷۲F با چیدمان  $(m \times n = 8 \times 7)$  نسبت به ظرفیت ۲۱F با چیدمان  $(3 \times m \times n = 3 \times 8 \times 7)$  به لحاظ انرژی برای توسعه آینده و صرفه اقتصادی بهینه است.

$$I_T = \frac{V \cdot s}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad \tau = \frac{L_T}{R_T} \quad (7)$$

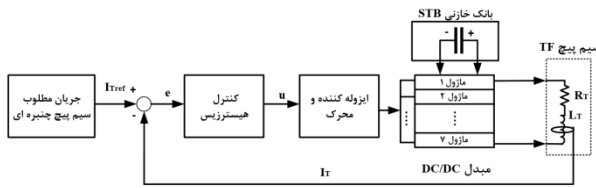
#### ۴. طراحی مبدل قدرت و سیستم کنترل جریان

با توجه به طراحی بخش ۳، تغذیه سیم پیچ چنبره‌ای از دو مرحله سریع و آهسته تشکیل شده است. در این طرح بانک خازنی FTB به صورت تخلیه طبیعی از طریق سوییچ ایگنیترون به شماره IRT-5 0980 تخلیه می‌شود و در بیشینه جریان آن،





شکل ۱۱. مدار کلی مبدل جریان با ۷ ماژول موازی.



شکل ۱۲. ساختار حلقه بسته کنترلی برای تنظیم جریان  $I_T$  در ناحیه تخت.

در این روش به منظور عدم تداخل در میدان الکتریکی پلاسما توکامک، لازم است حداکثر فرکانس ریپل جریان چنبره‌ای مشخص گردد تا بر اساس آن حداکثر فرکانس کلیدزنی مبدل تعیین گردد. ضروری است فرکانس کلیدزنی به مراتب کم‌تر از حداکثر فرکانس ریپل جریان چنبره‌ای باشد در غیر این صورت باعث ناپایداری پلاسما می‌شود. در این ساختار کنترلی، سیگنال کنترل ( $u$ ) با یک باند مقایسه می‌گردد، اگر  $u$  بیش‌تر از باند بالایی باشد تریستورهای  $T_1$  خاموش می‌گردند تا جریان کاهش یابد و اگر کوچک‌تر از باند پایینی باشد تریستورهای  $T_1$  روشن شده و جریان را افزایش می‌دهد. به منظور محاسبه فرکانس ریپل جریان، مدار ساده شده سیم‌پیچ TF، مبدل چاپر به همراه بانک ابر خازنی STB در شکل ۱۳ نشان داده شده است. با توجه به آن می‌توان جریان را به صورت رابطه ۱۰ بیان کرد.

$$I_T(t) = \begin{cases} \frac{E_T(t) - (E_T(t) - i_1 R_T) e^{-\frac{R_T}{L_T} t}}{R_T} & \cdot < t < DT \quad u = 1 \\ \frac{i_1 R_T e^{-\frac{R_T}{L_T} (t-DT)}}{R_T} & DT < t < T \quad u = 0 \end{cases} \quad (10)$$

که در آن برای  $u > 0$  جریان افزایشی و برای  $u < 0$  جریان کاهشی خواهد بود.  $i_1 = I_T - \frac{\Delta i}{\gamma}$  و  $i_2 = I_T + \frac{\Delta i}{\gamma}$  به ترتیب مقدار باند پایین و بالا هستند و  $I_T$  مقدار تنظیمی در محدوده  $13.5 kA < I_T \leq 18 kA$  است.  $E_T(t)$  معادل

مشخص است که مدت زمان خاموش‌سازی ( $t_1$ ) تریستور  $T_1$  با توجه به مقادیر  $L$  و  $C$  تعیین می‌گردد که مطابق روابط ۸ و ۹ محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$U_c = 2U = U(1 - \cos \omega t_1) \quad (8)$$

$$t_1 = \pi \sqrt{LC} \quad (9)$$

جهت عملکرد مطلوب سوئیچینگ تریستورها لازم است مدت زمان خاموش‌سازی به مراتب کم‌تر از مدت زمان ریپل جریان ( $\tau_{\Delta i}$ ) باشد [۱۵]. با فرض  $t_1 = 87 \mu s$  و جریان بیشینه  $250 A$  برای کموتاسیون، مقدار  $L$  و  $C$  بر اساس روابط ۸ و ۹ به ترتیب  $86 \mu H$  و  $9 \mu F$  حاصل می‌گردد که در آن تحمل ولتاژ خازن  $4 kV$  و جریان  $250 A$  است.

در شکل ۱۱ ساختار کلی تخلیه جریان در سیم‌پیچ TF از بانک FTB و بانک ابرخازنی STB نشان داده شده است. با توجه به شکل، مشخص است که بانک FTB از طریق ignitron و بانک خازنی STB از ۷ ماژول موازی مبدل چاپر جهت کنترل و تنظیم سطح جریان تخلیه می‌شود که هر کدام از ماژول‌ها مربوطه به شکل ۱۰ می‌باشد. برای اتصال هم‌زمان آن‌ها، علاوه بر تأمین سیگنال کنترلی، از یک سلف در خروجی هر ماژول با مشخصات  $10 \mu H$  و  $2.5 kA$  استفاده می‌شود.

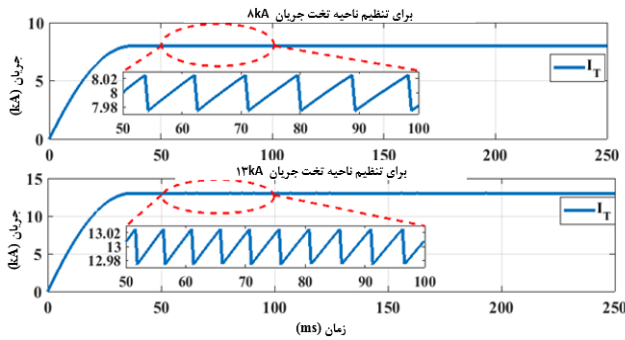
با در نظر گرفتن مبدل قدرت در شکل ۱۱، لازم است با به کارگیری سیستم کنترل حلقه بسته و جریان مطلوب سیم‌پیچ چنبره‌ای، جریان خروجی مبدل کنترل گردد. بر این اساس در شکل ۱۲ نمای سیستم کنترلی برای تنظیم جریان مطلوب ناحیه تخت سیم‌پیچ TF ارائه شده است، که در آن بلوک مبدل DC/DC بیانگر ۷ ماژول موازی چاپر، بلوک ایزوله‌کننده<sup>۱</sup> و محرک<sup>۲</sup> جهت راه‌اندازی و ایزوله مدارات ولتاژ بالا و بلوک جریان مطلوب سیم‌پیچ چنبره‌ای<sup>۳</sup> جهت تولید جریان مطلوب می‌باشد. در این ساختار، به طور لحظه‌ای جریان مطلوب سیم‌پیچ چنبره‌ای ( $I_{Tref}$ ) با جریان لحظه‌ای ( $I_T$ ) مقایسه می‌گردد و خطای آن از طریق سیستم کنترل هیستریزس برای ایجاد کم‌ترین ریپل، کمینه می‌شود.

طراحی بخش کنترلی می‌تواند با مدل‌سازی مبدل قدرت و پارامترهای سیم‌پیچ صورت گیرد، اما با به کارگیری روش کنترل هیستریزس [۱۵]، می‌توان بدون نیاز به مدل‌سازی با در نظر گرفتن یک باند قابل تنظیم، جریان خروجی را در محدوده تغییرات حداکثر  $\pm 25 A$  تثبیت کرد.

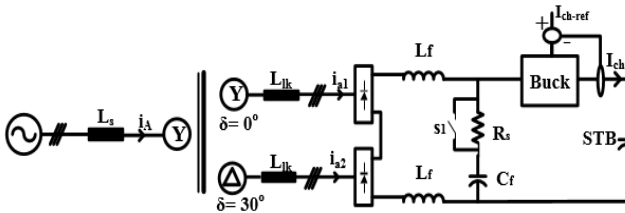
1. Isolator
2. Actuator
3. Toroidal Desired Current







شکل ۱۴. نتایج شبیه‌سازی سیستم کنترل و مبدل‌ها برای تثبیت جریان در دو مقدار ۸ kA و ۱۳ kA به همراه ریبیل و فرکانس در ناحیه تخت.



شکل ۱۵. نمای کلی مدار شارژر بانک STB.

با در نظر گرفتن ظرفیت (۷۲F)، ولتاژ (۷۵۳V) و مدت زمان شارژ (۶۰s) و همچنین رابطه  $It=CV$ ، حداقل جریان شارژ تقریباً ۹۱A به دست می‌آید. لذا به دلیل زیاد بودن جریان شارژ و همچنین کاهش THD و عدم آسیب به دیگر تجهیزات متصل به شین از مبدل ۱۲ پالسه استفاده شده است.

در مدار شکل ۱۵، نسبت تبدیل ترانس YY برابر  $\frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{11}$  و  $Y\Delta$  برابر  $\frac{1}{11 \times \sqrt{3}}$  است و می‌تواند ولتاژ ثابتی برابر ۱/۱ kV تولید کند،  $L_{lk}$  امپدانس نشستی ترانس و  $L_s$  امپدانس خط سه فاز است. در این طراحی با در نظر گرفتن ریبیل مطلوب زیر ۵٪، مقادیر سلف  $L_f$  و خازن  $C_f$  از روابط ۱۲ و ۱۳ به دست می‌آید [۱۵].

$$L_f = \frac{1.55 \times 10^{-3} \times V_{LL-max}}{4\pi f I_{max}} \quad (12)$$

$$C_f = \frac{1}{4\pi^2 (12f)^2 L} \quad (13)$$

با توجه به روابط ۱۲ و ۱۳،  $L_f = 30 \mu H$  و  $C_f = 2.6 mF$  برای تحمل ولتاژی  $V_{LL-max} = 2500 V$  و جریان بیشینه  $I_{max} = 200 A$  و فرکانس ۵۰Hz به دست می‌آید.

به دلیل بالا بودن ظرفیت  $C_f$  و ولتاژ آن، به منظور جلوگیری از جریان هجومی، مقاومت  $R_s = 100 \Omega$  با بانک STB سری شده است. با توجه به ثابت زمانی ( $\tau = R_s C_f$ ) مقاومت سری  $R_s$  پس از گذشت ۲/۵ s توسط کنتاکتور از مدار خارج می‌شود.

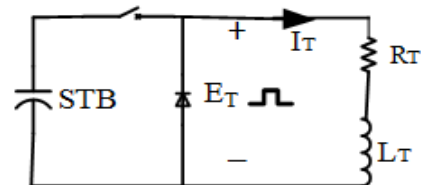
لحظه‌ای ولتاژ بانک خازنی آهسته و  $D_T$  عرض پالس است. همچنین فرکانس ریبیل ( $f_r$ ) بر اساس رابطه ۱۱ تعیین خواهد شد:

$$\frac{1}{f_r} = \frac{\Delta i \times L_T}{R_T} \times \frac{V_{STB}}{V_{FTB}} \quad (11)$$

با توجه به رابطه ۱۱، فرکانس ریبیل برای تثبیت جریان ۱۳ kA و ۸kA به ترتیب ۱۲۹/۲ Hz و ۷۶/۷ Hz حاصل می‌گردد. شبیه‌سازی ساختار سیستم کنترل شکل ۱۲، با انتخاب پارامترهای بانک‌های خازنی، ماژول‌های مبدل چاچر و سیستم کنترل با باند هیستریزس  $\pm 25A$  در نرم‌افزار متلب انجام گردید. نتایج شبیه‌سازی برای تثبیت جریان در دو مقدار ۱۳ kA و ۸ kA در شکل ۱۴ ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۴، نتایج شبیه‌سازی سیستم طراحی شده در تأمین حداکثر و حداقل جریان، مدت زمان، فرکانس و دامنه ریبیل جریان مطابق خواسته و قیود می‌باشد. مشخص است که ریبیل جریان در حدود ۲۵A است که مطابق قید طراحی معادل ۰/۲٪ میدان اصلی است.

### ۵. طراحی سیستم شارژر بانک ابر خازنی STB

در توکامک ارتقا یافته، با توجه به نوع منبع انرژی که بر مبنای بانک‌های ابرخازنی و خازن می‌باشد، لازم است که بانک خازنی FTB و ابرخازن STB با به کارگیری جریان مستقیم (DC) شارژ شوند. لازم به ذکر است که، شارژر بانک‌های FTB با روش کنترل توان مبدل ۶ پالسه قبلی شارژ خواهد شد. برای تأمین انرژی بانک STB با در نظر گرفتن ولتاژ نهایی بانک، ظرفیت و مدت زمان لازم برای شارژ، یک مبدل AC/DC جدید طراحی می‌گردد. با توجه به خط ۳ فاز ۶۰۰A و ۳۸۰V ورودی ساختمان و در نظر گرفتن ولتاژ شارژ ۷۲۰V و حداکثر زمان شارژ ۱۰ دقیقه، طراحی مبدل با روش جریان ثابت انجام گردید. برای کنترل جریان ثابت شارژ، از یک مبدل DC/DC کاهنده باک<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. نمای کلی مدار شارژر در شکل ۱۵ ارائه شده است.



شکل ۱۳. مدار ساده شده سیم‌پیچ TF و مبدل چاچر به همراه بانک ابرخازنی STB.

1. Buck



همان‌طور که مشخص است، در جریان شارژ ثابت، فرایند شارژ در مدت زمان تقریبی ۵۶۵ s انجام می‌گیرد؛ افزایش ولتاژ بانک خازنی به صورت خطی و ریپل جریان شارژ کم‌تر از ۴A است. در شکل ۱۷ ولتاژ ورودی و جریان ورودی ترانسفورماتور نشان داده شده است. با توجه به افزایش ولتاژ شارژ و ثابت بودن جریان شارژ در سمت ثانویه مدار، هم‌چنین ثابت بودن ولتاژ در ورودی ترانس در سمت اولیه، جریان ورودی ترانس در طول زمان شارژ افزایش می‌یابد.

### ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، طراحی جدیدی برای سیستم تأمین انرژی و کنترل تخلیه جریان برای سیم‌پیچ چنبره‌ای توکامک دماوند جهت افزایش زمان ماندگاری پلازما انجام شد. با توجه به محدودیت‌های عملکردی و هزینه‌های اقتصادی، بانک خازنی موجود با کاهش ظرفیت آن به عنوان بانک خازنی سریع در نظر گرفته شد و بانک خازنی آهسته بر پایه ماژول‌های ابرخازنی طراحی گردید. ظرفیت، ولتاژ و جریان هر کدام از بانک‌ها محاسبه شد. در ادامه چیدمان مبدل قدرت لازم برای تخلیه کنترل شده جریان بانک ابرخازنی در سیم‌پیچ چنبره‌ای در ۷ ماژول چاپر بر پایه ترایستور طراحی و شبیه‌سازی شد. برای تأمین انرژی بانک ابر خازنی نیز، مبدل AC/DC ۱۲ پالسه به همراه مبدل باک با جریان ثابت ۱۰۰A و با ریپل ۵٪، طراحی و شبیه‌سازی شد که نتایج آن‌ها نشان از عملکرد مناسب طراحی دارد.

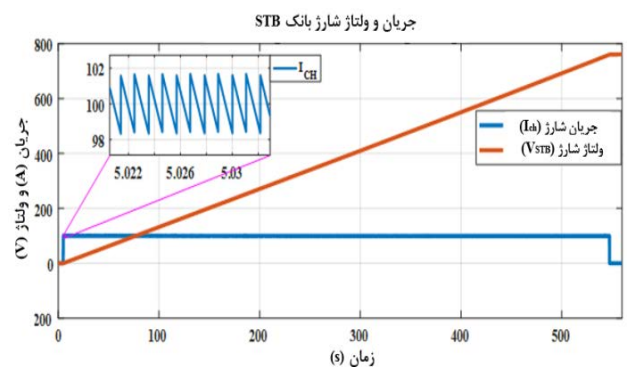
در مبدل باک، سوئیچ از نوع IGBT با حداکثر جریان و ولتاژ ۱۵۰A و ۲kV است و برای طراحی فیلتر LC از روابط ۱۴ و ۱۵ استفاده می‌شود [۱۵].

$$L = \frac{(V_i - V_{STB})D}{\gamma \times \Delta I \times f_s} \quad (14)$$

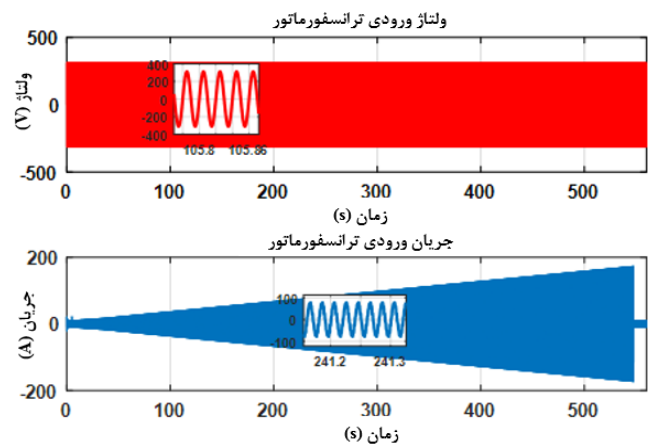
$$C = \frac{\Delta I}{\gamma f_s \Delta V_o} \quad (15)$$

که در آن، ولتاژ ورودی باک،  $DT$  عرض پالس PWM،  $f_s$  فرکانس کلیدزنی،  $\Delta I$  و  $\Delta V_o$  به ترتیب ریپل جریان خروجی و ریپل ولتاژ خروجی مبدل می‌باشد. اگر جریان شارژ بانک STB، ۱۰۰A، فرکانس ۲۰ kHz، ریپل ولتاژ ۰.۵٪ و ریپل جریان ۵٪ در نظر گرفته شود، مقادیر LC برابر ۱.۲ mH و ۱۶/۶  $\mu$ F به دست می‌آید.

نتایج شبیه‌سازی مدار کنترل شارژ بانک STB (شکل ۱۵)، با استفاده از نرم‌افزار متلب، برای ولتاژ و جریان شارژ به ترتیب ۷۶۰V و ۱۰۰A در شکل ۱۶ آورده شده است. هم‌چنین نتایج شبیه‌سازی برای ولتاژ و جریان ترانسفورماتور مربوطه در شکل ۱۷ ارائه شده است.



شکل ۱۶. نتایج شبیه‌سازی مدار کنترل شارژ بانک ابرخازنی STB (ولتاژ و جریان شارژ ۷۶۰V و ۱۰۰A).



شکل ۱۷. نتایج شبیه‌سازی مدار کنترل شارژ، ولتاژ و جریان ورودی ترانسفورماتور در مدار شکل ۱۵.

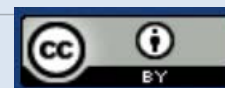


## مراجع

1. A. Lampasi, S. Minucci, *Survey of electric power supplies used in nuclear fusion experiments*, In: [17th International Conference on Environment and Electrical Engineering](#), (IEEE, Milan, 2017) 1-6.
2. A. Lampasi, et al., *A new generation of power supplies for pulsed loads*, [Fusion Eng. Des.](#), **146**, 1921 (2019).
3. A. Magnanimo, et al., *Supercapacitors-based power supply for ASDEX upgrade toroidal field coils*, [Fusion Eng. Des.](#), **171**, 112574 (2021).
4. I. Ciocan, et al., *An improved method for the electrical parameters identification of a simplified pspice supercapacitor model*, In: [22nd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging \(SIITME\)](#), (IEEE, Oradea, Romania, 2016), 171-174.
5. G. Maffia, A. Lampasi, P. Zito, *A new generation of pulsed power supplies for experimental physics based on supercapacitors*, In: [15th International Conference on Environment and Electrical Engineering \(EEEIC\)](#), (IEEE, Rome, 2015), 1067-1072.
6. D.K. Sharma, et al., *Multimodular, high current, fast response IGBT inverter power supply of SST-1 tokamak*, In: [17th European Conference on Power Electronics and Applications \(EPE'15 ECCE-Europe\)](#), (IEEE, Geneva, Switzerland, 2015), 1-10.
7. A. Sykes, et al., *The ST25 Tokamak for rapid technological development*, In: [25th Symposium on Fusion Engineering \(SOFE\)](#), (IEEE, San Francisco, 2013), 1-4.
8. M.A. Torres, *Coils and power supply design for the small aspect ratio tokamak (SMART) of the university of Seville*, [M.Sc. Thesis, Fusion Eng. Des.](#), (2020).
9. M.A. Torres, et al., *Coils and power supplies design for the SMART tokamak*, [Fusion Eng. Des.](#), **168**, 112683 (2021).
10. A. Lampasi, et al., *Compact power supply with integrated energy storage and recovery capabilities for arbitrary currents up to 2 kA*, [IEEE Transactions on Plasma Science](#), **46(10)**, (2018).
11. A. Lampasi, et al., *A new generation of power supplies for pulsed loads*, [Fusion Eng. Des.](#), **146**, 1921 (2019).
12. S.K. Nielsen, et al., *First results from the NORTH tokamak*, [Fusion Eng. Des.](#), **166**, 112288, (2021).
13. H. Rasouli, *Identification of the neural nonlinear model of the vertical plasma location in the Damavand tokamak and the design of the neural nonlinear controller*, [Master's Thesis, Khajeh Nasir University of Technology](#), (2017) (In Persian).
14. J. Taheri, C. Rasouli, F.A. Davani, *Time-Dependent Thermo-Electro-Magneto-Mechanical Analysis of the TF Coil in Damavand Upgrade Tokamak With Longer Pulse Operation*, [IEEE Transactions On Plasma Science](#), **49(1)**, 424 (2021).
15. K. Abbaszadeh, *Power-Electronics-Design-&-Analysis*, ([Publication.kntu, May-2015](#)) (In Persian).
16. www.Maxwell.com.
17. www.m.made-in-china.com.

## COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



## استناد به این مقاله

حسین رسولی، امیررضا دارابی، کریم عباسزاده، حجت بابایی، امیرحسین معروفخانی (۱۴۰۲)، طراحی سیستم تأمین انرژی سیم‌پیچ چنبره‌ای بر پایه ابرخازن به منظور افزایش زمان پلاسما در توکامک دماوند، ۱۰۴، ۱۲۷-۱۳۷

DOI: [10.24200/nst.2023.1377](https://doi.org/10.24200/nst.2023.1377)

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1377.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1377.html)

