بررسی اثربخشی تئوری P-Q در کاهش شارش هارمونیک مبدل تغذیه میدان چنبره‌ای توکامک ابررسانا

INC29-1181

علیرضا حفظ‌الصحه *، لاله عطائی‌سرشت

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

چکیده:

در این مقاله شارش هارمونیکی متأثر از عملکرد مبدل تغذیه میدان چنبره‌ای توکامک ابررسانا از نوع به کار گرفته شده در توکامک ایتر، مورد مطالعه سیستمی قرار گرفته است. رفتار هارمونیکی مبدل مذکور و ساختار یک کنترل دینامیکی ساده مبتنی بر تئوری P-Q تحت پارامترهای مطالعاتی در نقطه اتصال مشترک بارهای غیرخطی از باس 10 *kV* توسط نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی شده و نتایج آن ارائه گردیده است. بررسی الگوی سطوح هارمونیکی و توان راکتیو مصرفی در ناحیه شارژ (Ramp-up) با نرخ صعود 7 *kA/s* و ناحیه پایداری جریان (Flat-top) با مقدار 10 *kA* بیانگر پاسخ مناسب تئوری P-Q می‌باشد که بر اساس استاندارد بین‌المللی IEEE-519 رضایت‌بخش توصیف می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: میدان چنبره‌ای توکامک ابررسانا، مبدل تغذیه دو ربعی، تئوری توان لحظه‌ای، هارمونیک

Investigating the effectiveness of P-Q theory in reducing the harmonic flux of power supply converter TF coils of superconducting tokamak

Hefzolsehhe *, L. Ataeiseresht

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

Abstract:

In this article, have been studied the harmonic flux of the superconducting tokamak TF coils converter of type used in ITER. The harmonic behavior converter and structure P-Q Theory of are simulated by PSCAD/EMTDC software under study model at the 10 kV bus. The results obtained in the current ramp-up with a rising rate of 7 kA/s and flat-top phase with a value of 10 kA indicate the appropriate response of the controller and are satisfactory according to the IEEE-519 standard.

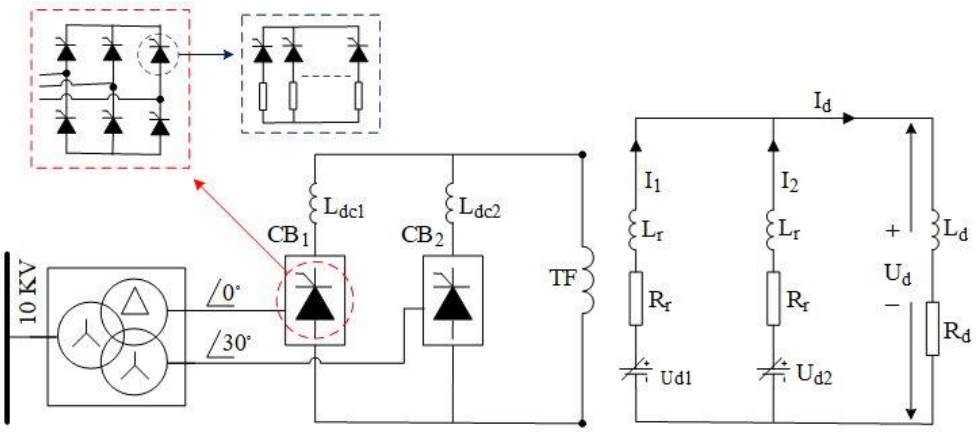
Keywords: Superconducting tokamak TF, Quadrant converter, P-Q Theory, Harmonic

۱. مقدمه

میدان چنبره‌ای (TF) و میدان قطبی (PF) به‌طور عمده در محصورسازی و کنترل شکل و مکان پلاسما نقش دارند. در توکامک‌های ابررسانا به‌منظور هدایت جریان‌های DC بالا و شکل‌گیری میدان‌های مغناطیسی قوی، از سیم‌پیچ‌های ابررسانایی که مقاومت بسیار ناچیز داشته و به لحاظ اقتصادی برای دوره کاری طولانی‌مدت مناسب‌ترند، استفاده می‌شود. معمولاً برای ایجاد میدان‌های مغناطیسی مذکور، چندین سیم‌پیچ در چیدمان خاصی قرار داده می‌شوند. به‌طور متداول، تغذیه سیم‌پیچ‌های TF از طریق مبدل‌های AC/DC انجام می‌پذیرد که ساختارهای متفاوتی برای ایجاد مبدل‌های مذکور وجود دارد. بهره‌برداری از مبدل ۱۲ پالس دو ربعی جهت تأمین انرژی موردنیاز سیم‌پیچ‌های TF نمونه‌ای از مبدل‌های AC/DC می‌باشد که در طرح توکامک ابررسانای ITER نیز موردتوجه قرار گرفته است [۱، ۲]. به هنگام تأمین انرژی سیم‌پیچ‌های TF ازآنجاکه نمودار جریان بار در هریک از سیم‌پیچ‌های مغناطیسی می‌تواند متفاوت از سیم‌پیچ‌های دیگر باشد، لذا رفتار توان راکتیو و هارمونیک‌های ناشی از مبدل‌های AC/DC منبع تغذیه در نقطه مشترک این بارهای غیرخطی بسیار دینامیک و متغیر بوده که در نهایت می‌تواند منجر به افت ولتاژ و اخلال در عملکرد صحیح تجهیزات الکتریکی شود. راهکارهای سنتی حذف هارمونیک و جبران توان راکتیو در توکامک عمدتاً معطوف به استفاده از جبران‌کننده‌های استاتیکی می‌باشد. اما به‌طورکلی عیب روش‌های سنتی در این است که اولاً به عناصر منفعل همانند خازن که عمر کوتاهی دارند وابسته می‌باشند، ثانیاً تغییرات سلف برحسب زاویه آتش تریستورها، یک تابع غیرخطی است. ثالثاً به هنگام استفاده از جبران‌سازهای سنتی در آرایش مثلثی شکل نیز به‌غیراز هارمونیک سوم، باقی هارمونیک‌ها از مرتبه فرد ۵ به بالا در سیستم حضور خواهند داشت [۳-۵].

۲. مبدل تغذیه دو ربعی سیم‌پیچ TF

مبدل ۱۲ پالسی AC/DC دو ربعی شامل دو مبدل تریستوری ۶ پالس موازی CB_1 و CB_2 می‌باشد که از ثانویه یک ترانسفورماتور ستاره- مثلث- ستاره با اختلاف فاز ۳۰ درجه پسفاز تغذیه شده و جریان dc را در یک فرآیند دو ربعی ایجاد می‌نمایند. در سر هر پل ۶ پالسی نیز یک راکتور dc به‌صورت سری وجود دارد تا دو مبدل به‌صورت موازی کار کرده و کنترل جریان‌های طرفین امکان‌پذیر باشد. در شکل ۱ طرح‌واره مبدل مذکور به همراه مدار معادل مربوطه نشان داده‌شده است که در آن L_{dc1} و L_{dc2} راکتورهای dc و همچنین Ud_1، I_1 و Ud_2، I_2 به ترتیب ولتاژ دو سر و جریان خروجی مبدل ۶ پالس CB_1 و CB_2 می‌باشند. L_r و R_r نیز به ترتیب اندوکتانس و مقاومت کل هر حلقه مدار بسته بوده به‌طوری‌که R_r شامل مقاومت معادل ناشی از اندوکتانس نشتی ترانسفورماتور مبدل و مقاومت داخلی راکتور dc است. همچنین I_d و U_d نیز جریان و ولتاژ دو سر سیم‌پیچ TF با امپدانس L_d و R_d را نشان می‌دهند. به‌منظور اشتراک‌گذاری یکسان جریان خروجی از CB_1 و CB_2، ولتاژ مبدل اولی برابر $U_{d1} = U_d$ در نظر گرفته می‌شود. در این صورت عدم تعادل جریان را می‌توان از طریق مبدل دوم به‌صورت رابطه ۲ مشخص نمود.

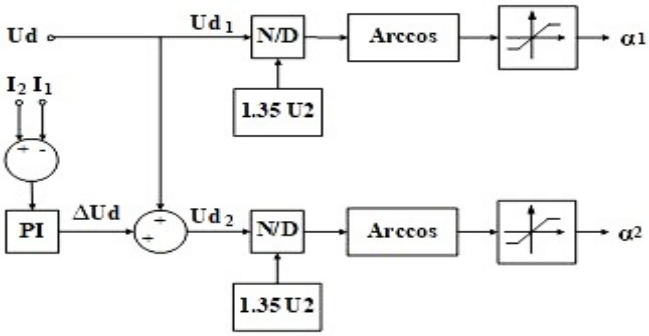


شکل ۱. طرح‌واره ساختاری و مدار معادل مبدل ۱۲ پالس AC/DC دو ربعی.

$$U_d = U_{d2} - I_2 (R_r + L_r) \quad (۱)$$

$$i_2 = \frac{U_{d2} - U_d}{R_r + L_r} = \frac{U_{d2} - U_{d1}}{R_r + L_r} = \frac{\Delta U}{R_r + L_r} \quad (۲)$$

از طرفی در پل‌های مبدل ۶ پالس روابط $U_{d2} = 1.35 U_2 \cos\alpha_2$ و $U_{d1} = 1.35 U_2 \cos\alpha_1$ صادق است که در آن U_2 مقدار مؤثر ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور مبدل و α_1 و α_2 زاویه آتش مبدل‌های CB_1 و CB_2 می‌باشد [۶]. بنابراین الگوریتم کنترلی مبدل ۱۲ پالس دو ربعی را می‌توان به‌صورت بلوک دیاگرام شکل ۲ طراحی نمود.



شکل ۲. بلوک دیاگرام استراتژی کنترل مبدل AC/DC دو ربعی.

۳. مدل ریاضی جریان‌های جبرانی

در این تحقیق برای استحصال جریان‌های جبرانی به‌منظور حذف مؤلفه‌های نامطلوب هارمونیکی متأثر از عملکرد مبدل دو ربعی و همچنین جبران توان راکتیو مصرفی که توسط منبع تغذیه تأمین می‌شود، از تئوری توان لحظه‌ای P-Q استفاده شده است. در این تئوری با استفاده از تبدیل کلارک می‌توان متغیرهای ولتاژ و جریان سیستم سه فاز متقارن از محورهای مختصات a, b, c را که با یکدیگر ۱۲۰ درجه اختلاف فاز دارند به محورهای ثابت α, β منتقل نموده و محاسبات مربوط به شناسایی جریان‌های مرجع را دنبال نمود. مقادیر لحظه‌ای متغیرهای ولتاژ و جریان بار متقارن در مختصات α, β عبارت‌اند از [۷]:

$$T = \sqrt{\frac{۲}{۳}} \begin{bmatrix} ۱ & \frac{-۱}{۲} & \frac{-۱}{۲} \\ ۰ & \frac{\sqrt{۳}}{۲} & \frac{-\sqrt{۳}}{۲} \end{bmatrix} , \quad \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = T. \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} , \quad \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = T. \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (۳)$$

همچنین توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای نیز از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$p_L(t) = V_\alpha(t) i_{L\alpha}(t) + V_\beta(t) i_{L\beta}(t) = \bar{p} + \tilde{p} \quad (۴)$$

$$q_L(t) = V_\alpha(t) i_{L\beta}(t) - V_\beta(t) i_{L\alpha}(t) = \bar{q} + \tilde{q} \quad (۵)$$

که در آن $\bar{p}$ و $\bar{q}$ مؤلفه‌های متناظر با توان اکتیو و راکتیو جریان اصلی می‌باشند و همین‌طور $\tilde{p}$ و $\tilde{q}$ مؤلفه‌های متغیر با زمان یا مؤلفه‌های هارمونیکی جریان می‌باشند. با توجه به روابط ۴ و ۵ به سهولت می‌توان مقادیر لحظه‌ای جریان در مختصات α, β را برحسب توان به‌صورت رابطه ۶ به دست آورد.

$$\begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \left\{ \underbrace{\begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{توان اکتیو}} + \underbrace{\begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{توان راکتیو}} + \underbrace{\begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{مؤلفه هارمونیک}} \right\}$$

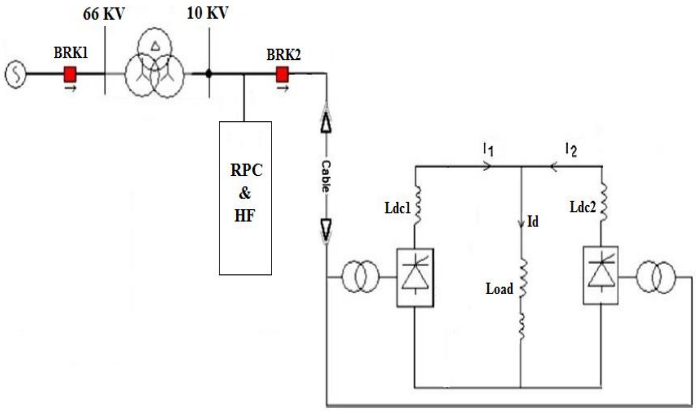
(۶)

لذا به‌منظور جبران هم‌زمان کل توان راکتیو و مؤلفه‌های نامطلوب هارمونیکی رابطه ۶، می‌بایست جریان‌های جبرانی در مختصات α ,β به‌صورت رابطه ۷ تعریف شوند که با استفاده از عکس تبدیل کلارک می‌توان جریان‌های مرجع در مختصات a, b, c را محاسبه نمود.

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \end{bmatrix} \qquad (۷)$$

۴. شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

طرح‌واره مطالعاتی مدار تغذیه میدان چنبره‌ای توکامک ابررسانا در شکل ۳ نشان داده‌شده است. با استفاده از محیط نرم‌افزار PSCAD/EMTDC عملکرد مبدل ۱۲ پالسی AC/DC دو ربعی به همراه مدل کنترل دینامیکی تئوری P-Q در نقطه اتصال مشترک بارهای غیرخطی از باس $۱۰kV$ شبیه‌سازی شده و رفتار هارمونیکی و توان راکتیو سیستم تحت پارامترهای مطالعاتی جدول ۱ طی پالس توانی ۱۲ ثانیه‌ای برای دو ناحیه شارژ (Ramp-up) و ناحیه پایداری جریان (Flat-top) مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج مربوطه در ادامه ارائه می‌شود.



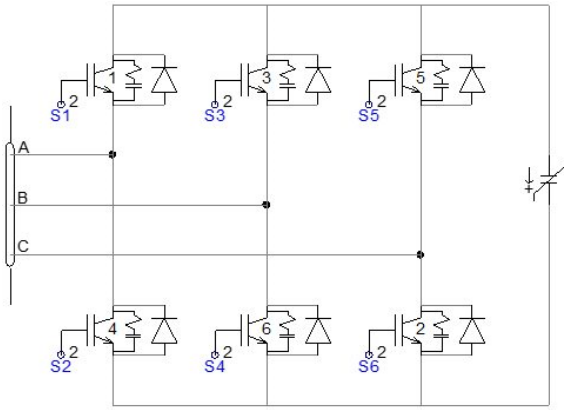
شکل ۳. مدل مطالعاتی تغذیه مبدل TF توکامک ابررسانا در PSCAD.

جدول ۱. پارامترهای مدل مطالعاتی.

پارامتر	مقدار
اندوکتانس بار (H)	۰/۱۴
مقاومت بار(Ω)	۰/۰۱
Ldc_1, Ldc_2 (H)	۰/۰۰۱
ماکزیمم جریان dc (kA)	۱۰
ماکزیمم di/dt (kA/s)	۷
ولتاژ مبدل (kV)	±۱
توان اکتیو/ راکتیو (MVAR /MW)	۱۳/۱/۴۲

۴. ۱. ملاحظات فنی پیاده‌سازی تئوری P-Q

در این شبیه‌سازی به‌منظور اعمال جریان‌های جبرانی شناسایی شده رابطه ۷ از اینورتر سه فاز منبع ولتاژ کنترل‌شونده با جریان که مطابق شکل ۴ با شش سوئیچ در سه شاخه موازی مدل شده است، استفاده می‌شود. همچنین برای کنترل جریان‌های خروجی اینورتر از روش کنترل جریان باند هیسترزیس که یکی از سریع‌ترین و ساده‌ترین روش‌های کنترلی محسوب شده و تا به امروز در اکثر مدارهای کنترلی بکار گرفته می‌شود استفاده شده است [۸].

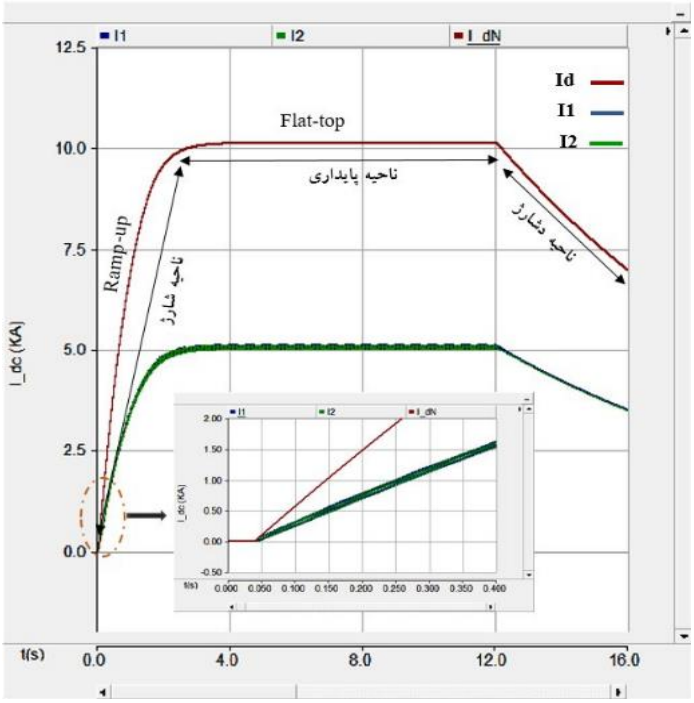


شکل ۴. مدل پیاده‌سازی اینورتر سه فاز در PSCAD.

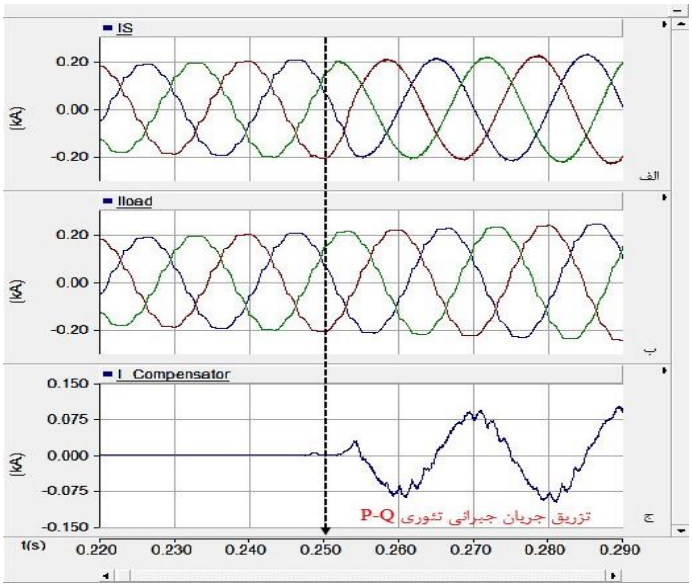
در این روش ابتدا ورودی کنترل‌کننده هیسترزیس، خطای e(t) بین جریان‌های مرجع و جریان‌های واقعی را حس می‌نماید. سپس چنانچه خطا از محدوده باند هیسترزیس بیشتر شود، بلافاصله پالس سوئیچینگ برای سوئیچ‌های اینورتر ارسال می‌گردد تا جریان اندازه‌گیری شده، از جریان مرجع تبعیت نماید. شایان‌ذکر است که به دلیل محدودیت‌های شبیه‌سازی، از شاخه‌های تریستوری موازی در هر فاز مبدل صرف‌نظر نموده و علیرغم آنکه سیم‌پیچ ابررسانا مقاومت ناچیزی در حد نانو اهم دارد، اما با توجه به مقاومت اتصالات، باس‌بارها و کابل‌ها بار مطالعاتی را به‌صورت RL مدل‌سازی می‌نماییم.

۴. ۲ . تحلیل نتایج

شکل ۵ نمودار جریان خروجی مبدل دو ربعی مورداشاره را تحت الگوریتم کنترلی بلوک دیاگرام شکل ۲ نشان می‌دهد که تأثیر عملکرد مبدل مذکور بر روی شکل موج منبع AC در دو وضعیت قبل و بعد از اعمال جریان‌های جبرانی تئوری P-Q در نمودار الف شکل ۶ ارائه شده است.

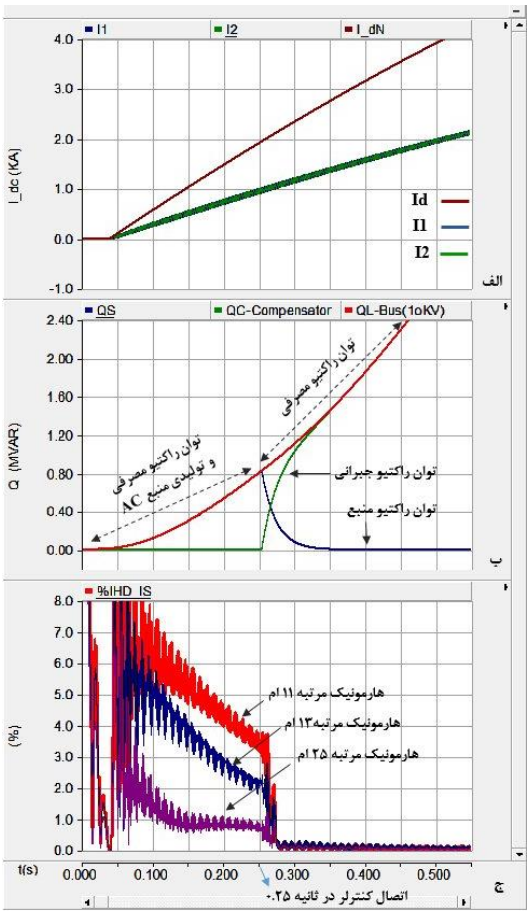


شکل ۵. نمودار جریان dc مبدل تغذیه دو ربعی.

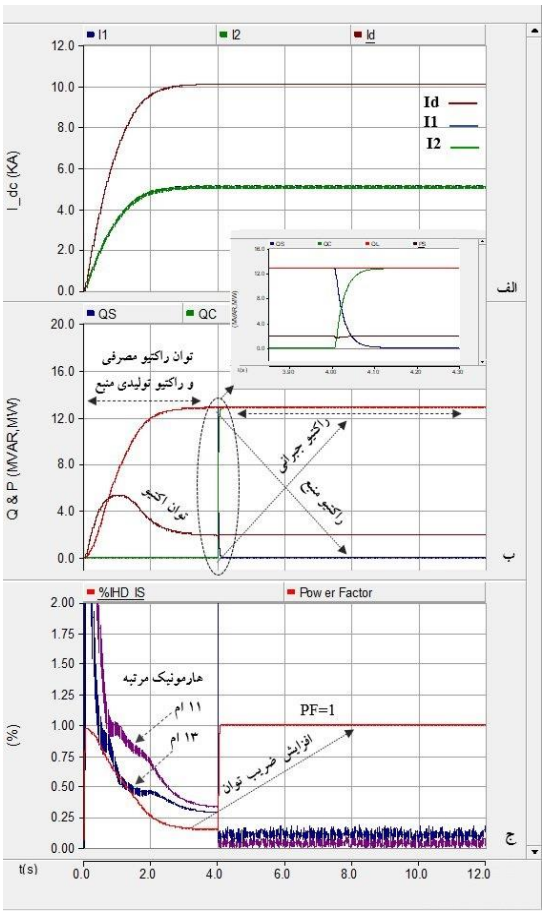


شکل ۶. الف) جریان منبع AC، ب) جریان بار، ج) جریان جبرانی تئوری P-Q.

همچنین در شکل‌های ۷ و ۸ نمودار الف، جریان مبدل دو ربعی، نمودار ب، رفتار توان راکتیو سیستم و نمودار ج، رفتار هارمونیکی سیستم، به ترتیب برای ناحیه شارژ و ناحیه پایداری جریان نشان داده‌شده است.



شکل ۷. نمودار الف) جریان dc ب) توان راکتیو، ج) هارمونیک در ناحیه شارژ.



شکل ۸. نمودار الف) جریان dc ب) توان راکتیو، ج) هارمونیک در ناحیه پایداری.

همان‌طور که در نمودارهای ب و ج مشاهده می‌شود بدون در نظر گرفتن تئوری P-Q تا قبل از ثانیه ۰٫۲۵-ام از ناحیه شارژ و ثانیه ۴-ام از ناحیه پایداری، تأمین توان راکتیو مصرفی به منبع AC تحمیل شده و به‌واسطه عملکرد مبدل تغذیه

میدان TF سطوح هارمونیکی از مرتبه ۱ ± n ۱۲ در سیستم حضور دارند که باعث اعوجاج در شکل موج ولتاژ و جریان منبع AC می‌گردند. اما در ادامه با اعمال جریان‌های جبرانی تئوری P-Q متناسب با تولید راکتیو جبرانی، سطح توان راکتیو تولیدی منبع AC کاهش یافته و به‌طور هم‌زمان، سطوح هارمونیکی موجود نیز کاهش می‌یابد به‌طوری‌که شاخص اعوجاج کل از مقدار ٪۵٫۳ به ٪۱٫۵ تنزل یافته و در محدوده مجاز استاندارد IEEE-۵۱۹ قرار می‌گیرد [۹]. این امر خود باعث بهبود شکل موج سینوسی منبع AC می‌شود که در نمودار الف شکل ۶ مشاهده گردید.

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق رفتار هارمونیکی متأثر از عملکرد مبدل تغذیه میدان چنبره‌ای توکامک ابررسانا از نوع به کار گرفته شده در توکامک ایتر و اثربخشی ساختار ساده تئوری P-Q در کنترل دینامیکی سطوح هارمونیکی و توان راکتیو، تحت مدل مطالعاتی در نقطه اشتراک بارهای غیرخطی باس *kV* ۱۰توسط نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی شده است. نتایج به‌دست‌آمده در هر دو ناحیه Ramp-up با نرخ صعود *kA/s* ۷ و Flat-top جریان dc با مقدار *kA* ۱۰ بیانگر پاسخ دینامیکی مناسب و پیوسته تئوری P-Q به تغییرات بار بوده و کاهش شاخص اعوجاج هارمونیکی کل از مقدار ٪۵٫۳ در لحظه اعمال جریان جبرانی تئوری P-Q به مقدار ٪۱٫۵ مطابق استاندارد بین‌المللی IEEE-۵۱۹ رضایت‌بخش توصیف می‌گردد. با توجه به سهولت پیاده‌سازی تئوری توان لحظه‌ای P-Q و سادگی ساختار آن به نظر می‌رسد که سامانه کنترلی مذکور در جبران توان راکتیو و کاهش شارش هارمونیک سیستم تأمین انرژی میدان چنبره‌ای توکامک ابررسانا مفید واقع گردد.

۶. مراجع

1. Z. Zhu, et al., *Study on the Current Sharing Control System of the TF Power Supply for a Superconducting Tokamak*, Plasma Science and Technology, Vol. 14, (2012).
2. R. Fan, et al., *Control and Operation Strategy Design of ITER Coil Power Supply System*, Fusion Engineering and Design, (2019).
3. J. D. Kong, et al., *Stabilization of the KSTAR Power System for the First Plasma Operation*, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, (2010).
4. Sihler et al., *Operational Experience with Reactive Power Control Methods Optimized for Tokamak Power Supplies*, Fusion Engineering and Design, pp.1139-1142, (2003).
5. Y. Wu et al., *Optimization for Tokamak Reactive Power Compensation and Filtering System*, J Fusion Energy, pp. 54–61, (2015).
6. M. U. Hassan, et al., *Four Quadrant Operation for ITER PF AC/DC Converter Using Fuzzy Logic Control System*, International conference, CHINA, (2016).
7. H. Akagi, et al., *Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices without Energy Storage Components*, IEEE Trans. Industry Applica, vol IA- 20, No. 3, pp. 625-630, (1984).
8. B. D. Jeswini, R. Shasidhar, and K.C. Venkataiah, *Improvement of Power Quality Using Hysteresis Current Controller by Shunt Active Power Filter*, University of Canterbury, Vol 13 No. 1, (2022).
9. IEEE Std 519-2014, *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, (2014).