

کاهش ظرفیت جبران ساز استفاده شده در سیستم CO-Phase با استفاده

از منابع تجدید پذیر و جبران سازی جزئی

احمدرضا نوروزی^۱، سید محمد موسوی گزافروزی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد راه آهن برقی، دانشکده مهندسی راه آهن دانشگاه علم و صنعت تهران، ایران، Ahmadreza_noroozi@rail.iust.ac.ir

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت تهران، ایران؛ sm_mousavi@iust.ac.ir

توسعه سریع راه آهن با سرعت بالا به طور قابل توجهی باعث افزایش ظرفیت حمل و نقل ریلی در سراسر جهان شده است که باعث افزایش برقی سازی و کاهش آلودگی های زیست محیطی می شود. برای حل مسائل کیفیت توان مربوط به راه آهن برقی، طرح های مختلفی برای جبران سازی ارائه شده است. با این حال به دلیل هزینه و پیچیدگی بالا تنها تعداد کمی از آنها به تصویب رسیده است. در منابع تغذیه کشش، سیستم Co-Phase همراه با HPQC قابلیت حل مشکلات کیفیت توانی که به علت بارهای تراکشن تک فاز را دارا می باشند. یک موضوع مهم تحقیقاتی کاهش ظرفیت HPQC به گونه ای که بتواند کیفیت توان را به صورت موثر بهبود بخشد می باشد. بزرگترین مشکل برای توسعه این سیستم ظرفیت بالای جبران ساز کیفیت توان و ولتاژ بالای لینک dc آن می باشد. یکی از روش های کاهش ظرفیت HPQC جبران سازی جزئی می باشد، که در آنها HPQC فقط مقداری از توان راکتیو بار را جبران سازی می کند. برای کاهش آلودگی های زیست محیطی، پیشنهاد شده است که منابع تجدید پذیر را با منابع تغذیه راه آهن ادغام شود که باعث به وجود آمدن یک سیستم پیچیده تر از لحاظ مدل سازی، طراحی و کنترل می شود. در این سیستم پیشنهادی منابع تجدید پذیر از طریق لینک dc به HPQC توان اکتیو تزریق می کنند. از طریق شبیه سازی های صورت گرفته قابل اثبات است که با ادغام منابع تجدید پذیر در سیستم تغذیه تراکشن Co-Phase و استفاده از تکنیک جبران سازی جزئی می توان به صورت میانگین ظرفیت HPQC را در این سیستم ۲۰ درصد کاهش داد.

کلمات کلیدی: منبع تغذیه کشش Co-Phase - انرژی های تجدید پذیر - کاهش ظرفیت جبران ساز HPQC

۱. مقدمه

قرار می گیرند [۳-۵]. در سال های اخیر به علت افزایش الودگی های کره زمین و افزایش هزینه ای تولید انرژی الکتریکی از سوخت های فسیلی به علت کاهش منابع سوخت های فسیلی استفاده از منابع تجدیدپذیر در سیستم های تغذیه نه فقط راه آهن برقی بلکه در تمامی سیستم های تغذیه مورد توجه قرار گرفته است. قابلیت اطمینان پایین منابع تجدیدپذیر باعث استفاده از این منابع به صورت ترکیبی با شبکه اصلی و استفاده از خواص مکمل منابع تجدید پذیر مختلف شده است. سیستم Co-Phase در سال ۱۹۹۰ در چین برای بهبود کیفیت توان [۱۱-۶] و حذف نقاط خنثی پیشنهاد شد [۱۳-۱۲].

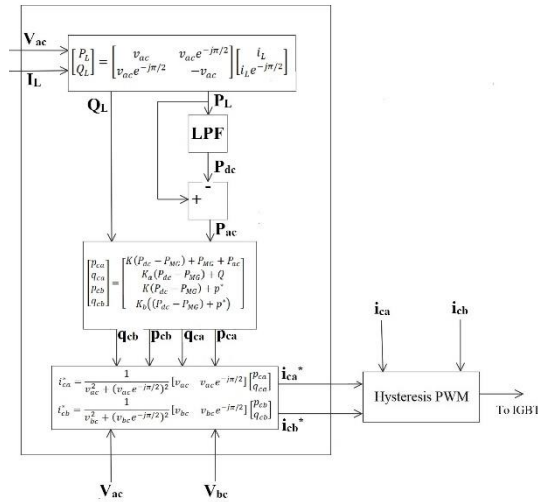
فلسفه استفاده از HPQC به همراه کولپینگ خازنی به جای RPC در سیستم تغذیه تراکشن Co-Phase کاهش ولتاژ لینک dc و در نتیجه کاهش ظرفیت جبران ساز می باشد [۱۵-۱۴]. برای کاهش ظرفیت HPQC روش های مختلفی مثل لینک dc تطبیق

امروزه استفاده از قطار های برقی برای حمل و نقل بین شهری افزایش چشم گیری داشته است. قطار های برقی با مزایا متعددی از قبیل آلوده نکردن محیط زیست، گشتاور اولیه بالا، راه اندازی سریع سیستم و راندمان بالا جایگاه خاصی در سیستم حمل و نقل زمینی دارند. قطار های برقی برای اولین بار در سال ۱۸۹۰ در انگلستان مورد استفاده قرار گرفتند و هم اکنون قسمت اعظم ناوگان حمل و نقل زمینی سراسر جهان را تشکیل می دهند اهمیت برقی سازی راه آهن در سیستم های حمل و نقل باعث می شود که کشور های مختلفی برای توسعه راه آهن برقی تلاش کنند جریان متناوب (AC) برای راه آهن های با مسیر بلند در کشور های مثل آمریکا، چین، هند و فرانسه مورد استفاده قرار می گیرد [۱-۲]. ترانسفورماتور های پست کشش برای تبدیل توان سه فاز به تک فاز و تغذیه لکوموتیو ها در این سیستم مورد استفاده قرار می گیرند. ترانسفورماتور های تک فاز به خاطر هزینه پایین و ساختار ساده آنها به صورت گسترده در منابع تراکشن مورد استفاده

پذیر [۱۶] یا نگاشت امپدانس [۱۷] یا استفاده از فیلتر نوع C در این سیستم [۱۸] یا روشی به نام جبران سازی جزئی [۱۹] ارائه شده است. در این مقاله با استفاده از منابع تجدید پذیر و استفاده از مفهوم جبران سازی جزئی ظرفیت HPQC کاهش داده شده است.

www.mhconf.ir

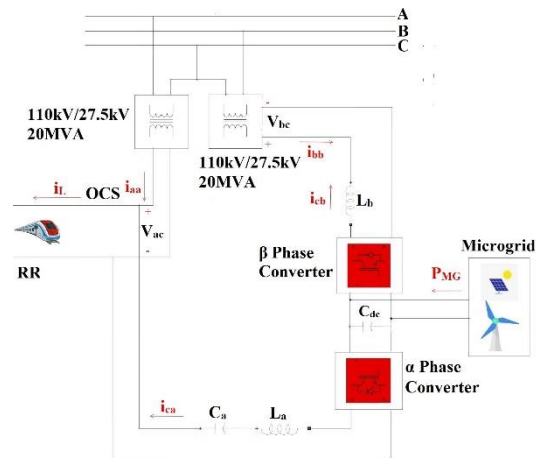
شود [۱۳]. برای کنترل این سیستم در حضور منابع تجدیدپذیر از تئوری PQ لحظه ای در حالت تکفاز [۲۱] استفاده می شود. بلوک دیاگرام الگوریتم کنترلی برای این سیستم در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. بلوک دیاگرام کنترلی سیستم

۲.۱. اصلاح مدل برای جبران سازی جزئی

با توجه به روش کنترل HPQC برای جبران سازی کامل، HPQC در هنگام عدم حضور منابع تجدید پذیر تحت جبران سازی کامل نصف توان اکتیو بار را منتقل می کند. پارامتر K که نشان دهنده درصد توان اکتیو بار که توسط HPQC تغذیه شده است می باشد، همچنین بر روی توان راکتیو تزریق شده به منبع اثر می گذارد زیرا ضریب توان نسبت بین توان اکتیو و توان راکتیو می باشد. دو پارامتر دیگر، زاویه فاز ها φ_a و φ_b ، برای اصلاح توان راکتیو در جبران سازی جزئی مورد استفاده قرار می گیرند. این پارامتر ها از طریق ضریب توان فاز مربوطه هنگام عملکرد HPQC به دست می آیند



شکل ۱. شماتیک ساده شبکه Co-Phase به همراه ریزشبكة

۲. مدلسازی و کنترل سیستم

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است سیستم تغذیه تراکشن Co-Phase به همراه منابع تجدید پذیر از یک ترانسفورماتور V/V و دو میدل به صورت پشت به پشت با یک لینک dc مشترک تشکیل شده است ریز شبکه به لینک dc جبران ساز کیفیت توانی متصل شده است و این سیستم برای رفع مشکلات کیفیت توانی بار راه آهن مثل عدم تعادل جریان که به خاطر تک فاز بود بار تراکشن، هارمونیک ها که به علت استفاده از یکسو سازها و درایو ها و توان راکتیو که به دلیل استفاده از موتور های القایی می باشد مورد استفاده قرار می گیرد [۲۰]. علاوه بر این در این ساختار شبکه با کم شدن تعداد نقاط خنثی به افزایش سرعت قطار نیز کمک می

$$I_{ca} = \sqrt{I_{cap}^2 + I_{caq}^2} = \sqrt{\left(K + (1-K)\frac{P_{MG}}{P_L}\right)^2 + \left(\tan(\varphi_L) + K_a\left(1 - \frac{P_{MG}}{P_L}\right)\right)^2} I_{Lp} \quad (2)$$

$$I_{cb} = \sqrt{I_{cbp}^2 + I_{cbq}^2} = \sqrt{\left(K\left(1 - \frac{P_{MG}}{P_L}\right)\right)^2 + \left(K_b\left(1 - \frac{P_{MG}}{P_L}\right)\right)^2} I_{Lp} \quad (3)$$

منابع تجدید پذیر به صورت زیر می باشد.

$$\begin{bmatrix} I_{cap} \\ I_{caq} \\ I_{cbp} \\ I_{cbq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{Lp}(K + (1-K)\frac{P_{MG}}{P_L}) \\ I_{Lp}(K_a(1 - \frac{P_{MG}}{P_L}) + \tan \phi_L) \\ I_{Lp}(K(1 - \frac{P_{MG}}{P_L})) \\ I_{Lp}(K_b(1 - \frac{P_{MG}}{P_L})) \end{bmatrix} \quad (1)$$

برای بررسی نرخ های جریان جبران سازی می توان از روابط (۲) و (۳) استفاده کرد. همانطور که گفته شد از بزرگترین مشکلات سر راه توسعه سیستم تغذیه تراکشن Co-Phase ظرفیت بالای جبران ساز استفاده شده در آن و حضور کلید های الکترونیک قدرت مند برای دستیابی به کیفیت توان رضایت بخش می باشد. با توجه به رابطه های (۲) و (۳) و رابطه ظرفیت HPQC در حضور منابع تجدید پذیر را به توجه به روابط $V_{bc} = \frac{\sqrt{3}}{N_1} V_A$ و $V_{ac} = \frac{\sqrt{3}}{N_1} V_A$ می توان به صورت رابطه (۴) بازنویسی کرد باید توجه کرد که برای سادگی نسبت تبدیل دو ترانسفورماتور یکی گرفته شده است همچنین باید توجه داشت که برای دقیق تر بودن مطالعات بهتر است که برای محاسبه ظرفیت مبدل های HPQC ولتاژ خروجی آنها در جریان های جبران سازی ضرب شود ولی به علت اینکه حجم محاسبات را به شدت افزایش می دهد با دقت قابل قبولی می توان فیلتر های خروجی HPQC را جزو HPQC حساب کرد و به اصل بررسی انجام شده مشکلی وارد نشود.

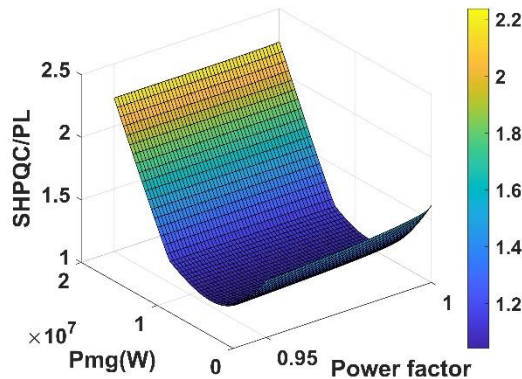
همانطور که از روابط (۲) و (۳) این دو رابطه به مقدار I_{Lp} وابسته هستند و همچنین به مقدار K نیز وابستگی دارند که خود K تابعی از ضرایب توان شبکه می باشد. پس بدین صورت می توان نتیجه گیری کرد که ظرفیت جبران کننده کیفیت توان نصب شده در این شبکه تابعی از ضرایب توان شبکه، مقدار توان تزریقی از طریق منابع تجدید پذیر و جریان اکتیو بار می باشد که ازین سه متغیر

www.mhconf.ir

فقط ضرایب توان شبکه و مقدار توان تزریقی از طریق منابع تجدید پذیر توسط ما قابل کنترل است. برای حل این مشکل با توجه به رابطه زیر ظرفیت HPQC را با جایگذاری روابط (۲) و (۳) در (۴) به صورت معادله نرمالیزه شده (۶) باز نویسی کرد.

$$P_L = \sqrt{3} V_A I_{Lp} / N_1 \quad (5)$$

در نمودار شکل ۳ نیز ظرفیت HPQC با توجه به معادله (۶) و بر حسب ضریب توان و توان تزریقی از طریق منابع تجدید پذیر برای ۱۵ مگاوات آمپر با ضریب توان بار ۰/۸۵ رسم شده است. همانطور که در این نمودار مشخص است با نزدیک شدن ضریب توان به واحد ظرفیت HPQC افزایش می یابد چون باید مقدار بیشتری توان راکتیو را تغذیه کند برای توان تزریقی نیز دارای یک حداقل می باشیم و هنگامی که توان تزریقی بزرگتر از توان اکتیو بار می شود ظرفیت HPQC به شدت افزایش می یابد که این که این موضوع به علت تزریق توان منابع تجدید پذیر از طریق مبدل فاز bc به شبکه می باشد.



شکل ۳. ظرفیت نرمالیزه HPQC بر حسب ضریب توان و توان تزریقی از منابع تجدید پذیر برای بار ۱۵ مگاوات آمپری با ضریب توان ۰/۸۵

$$S_{HPQC} = V_{ac} I_{ca} + V_{bc} I_{cb} = \frac{\sqrt{3} V_A}{N_1} \sqrt{I_{cap}^2 + I_{caq}^2} + \frac{\sqrt{3} V_A}{N_1} \sqrt{I_{cbp}^2 + I_{cbq}^2} \quad (4)$$

$$S_{HPQC}(\phi_a, \phi_b, \phi_c, P_{MG}) = P_L \sqrt{(K + (1-K)\frac{P_{MG}}{P_L})^2 + (K_a(1 - \frac{P_{MG}}{P_L}) + \tan \phi_L)^2 + (K(1 - \frac{P_{MG}}{P_L}))^2 + (K_b(1 - \frac{P_{MG}}{P_L}))^2} \quad (6)$$

با توجه به شکل ۳ هنگامی توان تزریقی از طریق منابع تجدید پذیر برابر صفر است مقدار ظرفیت HPQC بالا می باشد که همین اضافه کردن منابع تجدید پذیر باعث کاهش این ظرفیت خواهد شد.

۳. بررسی پارامتر های کیفیت توانی

با استفاده از ضرایب توان شبکه و استفاده از منابع تجدید پذیر می توان با انتخاب درست این دو پارمتر ظرفیت HPQC را به صورت مناسبی کاهش دهیم با توجه به شکل زیر که دیاگرام فازوری سیستم در حالت اضافه شدن منابع تجدید پذیر می باشد مشخص است که به هر مقداری که توان PMG زیاد شود باید I_{cap} کاهش یابد یعنی طول قسمت جریان اکتیو جبران سازی مورد نیاز برای شبکه ثابت می باشد، به همین خاطر زاویه جریان های جبران سازی را تغییر نمی دهیم.

www.mhconf.ir

$$\begin{bmatrix} i^0 \\ I^- \\ I^+ \end{bmatrix} = \frac{1}{N_1} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a e^{-j\psi_a} \\ I_b e^{-j\psi_b} \\ -I_a - I_b \end{bmatrix} \quad (7)$$

در این رابطه I_{aa} و I_{bb} جریان های ثانویه ترانسفورماتور V/V هستند و نیز طبق دیاگرام فازوری ψ_a برابر 30° درجه و ψ_b برابر 90° درجه می باشد. برای به دست آوردن اندازه جریان توالی منفی نیز باید از تبدیل فرسکیو استفاده کنیم. در نتیجه طبق رابطه (۸) برای اندازه جریان توالی منفی خواهیم داشت:

$$|I^-| \times N_1 = |(I_A + \alpha^2 I_B + \alpha I_C)| \quad (8)$$

با توجه به شکل ۱ می دانیم که جریان بار حاصل جمع جریان I_a با I_{ca} می باشد پس برای به دست آوردن جریان ها به صورت زیر خواهیم داشت:

$$I_{aap} = I_{Lp} - I_{cap} = I_{Lp} (1 - K - (1 - K) \frac{P_{MG}}{P_L}) \quad (9)$$

$$I_{aaq} = I_{Lq} - I_{caq} = I_{Lp} (-K_a (1 - \frac{P_{MG}}{P_L})) \quad (10)$$

$$I_{aa} = I_{aap} + jI_{aaq}$$

به همین صورت برای جریان I_b خواهیم داشت:

$$I_{bbp} = -I_{cbp} = I_{Lp} (K (1 - \frac{P_{MG}}{P_L})) \quad (11)$$

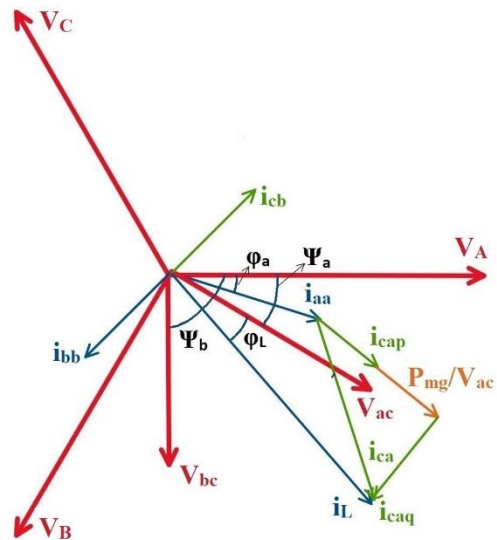
$$I_{bbq} = -I_{cbq} = I_{Lp} (K_b (1 - \frac{P_{MG}}{P_L})) \quad (12)$$

که در این روابط $k_a = \tan(\psi_a - \phi_a)(1 - k)$ و $k_b = \tan(\frac{2}{3}\pi - \psi_b + \phi_b)k$ می باشد.

با جایگذاری روابط بالا در رابطه (۸) همانطور که مشخص است رابطه جریان توالی منفی به ضریب توان شبکه و توان تزریقی از ریز شبکه وابسته است. با استفاده از رابطه زیر که برای عدم تعادل ولتاژ می باشد می توانیم حد جریان توالی منفی مجاز برای سیستم را تعیین کنیم.

$$\varepsilon_u = \frac{\sqrt{3}|I^-|V_L}{S_c} \times 100\% \leq 2\% \rightarrow |I^-| \leq \frac{2\% \cdot S_c}{\sqrt{3}V_L} \quad (13)$$

که در این رابطه S_c ظرفیت اتصال کوتاه سیستم می باشد و V_L نیز ولتاژ خط است با استفاده از رابطه بالا و شکل ۵ می توان محدوده توان تزریقی از طریق لینک dc را برای آنکه سیستم از نظر کیفیت توان به مشکل نخورد را مشخص کرد.



شکل ۴. دیاگرام فازوری سیستم

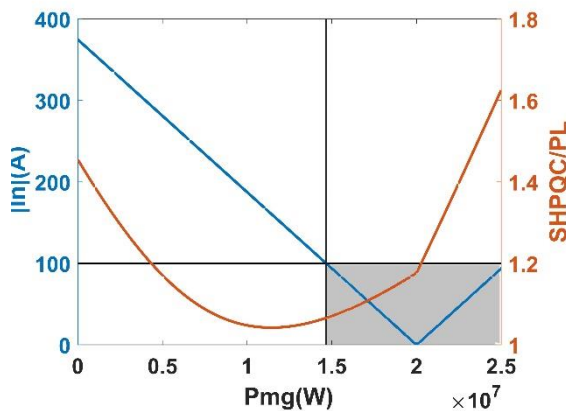
سوال اصلی در این سیستم این است که چه مقدار از بار را توسط منابع تجدید پذیر تغذیه کنیم تا هم ظرفیت HPQC کاهش بیاید هم شبکه از نظر کیفیت توانی رضایت بخش باشد. همانطور که در نمودار شکل ۳ مشخص است با انتخاب درست مقدار توان تزریقی از طریق روش کنترلی و تعیین ظرفیت منابع تجدید پذیر می توان ظرفیت HPQC را کاهش داد. ولی باید عدم تعادل جریان را حتما در نظر داشت که در ادامه به بررسی اضافه کردن منابع تجدید پذیر به سیستم Co-Phase و اثر آن روی عدم تعادل جریان سیستم می پردازیم.

با توجه به محدودیت ها و روابط موجود برای بهینه سازی ظرفیت HPQC در این سیستم به صورت زیر خواهیم داشت:

$$\min\{S = f_1(\varphi_a \cdot \varphi_b \cdot \varphi_c \cdot P_{MG})$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} |I^-| = f_2(\varphi_a \cdot \varphi_b \cdot \varphi_c \cdot P_{MG}) \leq \frac{2\% \cdot S}{\sqrt{3}V_L} & (14) \\ 0.95 \leq \arccos(\varphi_i) \leq 1 (i = a, b, c) \end{cases}$$

در شکل ۵ ظرفیت HPQC و اندازه جریان توالی منفی بر حساب توان تزریقی از منابع تجدید پذیر برای ضریب توان شبکه ۰/۹۸ و ۲۰ مگاواتی رسم شده است. همانطور که مشخص است حداقل ظرفیت HPQC (نمودار قرمز رنگ) در محدود مجاز پر رنگ نمی باشد و این وظیفه الگوریتم بهینه سازی می باشد که این مقدار بهینه را با توجه به حد اندازه جریان توالی منفی به صورت متناظر برای هر بار قطار تعیین کند.

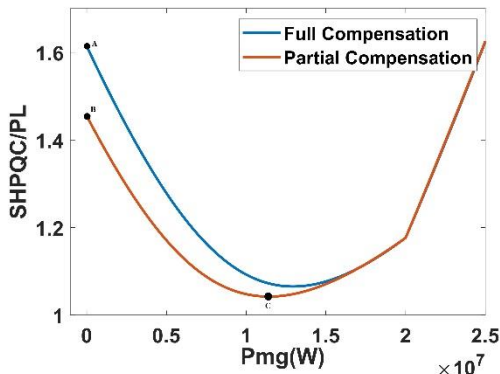


شکل ۵. ظرفیت HPQC و جریان توالی منفی سیستم باری بار ۲۰ مگاوات برای ضریب توان ۰/۹۸

۴. شبیه سازی سیستم

برای بررسی صحت روابط گفته شده در بالا و مدل سازی های انجام شده این سیستم باید شبیه سازی شود. نمودار نشان داده شده در شکل ۶ ظرفیت نرمالیزه شده HPQC را برای جبران سازی کامل و جبران سازی جزئی بر حسب توان تزریقی به لینک dc نشان می دهد. در این نمودار نقطه A ظرفیت HPQC تحت جبران سازی کامل و عدم حضور HPQC را نشان می دهد نقطه B نیز ظرفیت HPQC را در حالت جبران سازی جزئی با ضریب توان ۰/۹۵ و عدم حضور ریزشبه نشان می دهد با جبران سازی جزئی می توان ظرفیت را به مقدار ۱۰ درصد کاهش داد ولی نقطه C نشان دهنده حداقل ظرفیت HPQC که توسط تزریق توان از ریز شبکه ممکن است می باشد و تقریباً ۳۵ درصد کاهش را نشان می دهد.

www.mhconf.ir

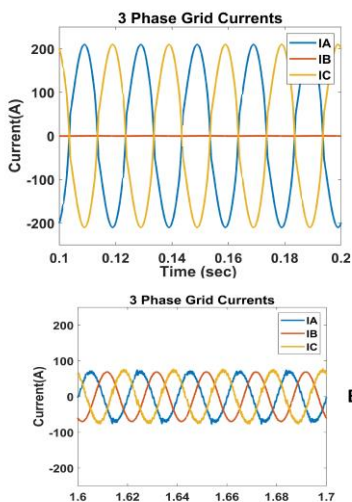


شکل ۶. مقایسه ظرفیت در حالت جبران سازی کامل و جبران سازی جزئی

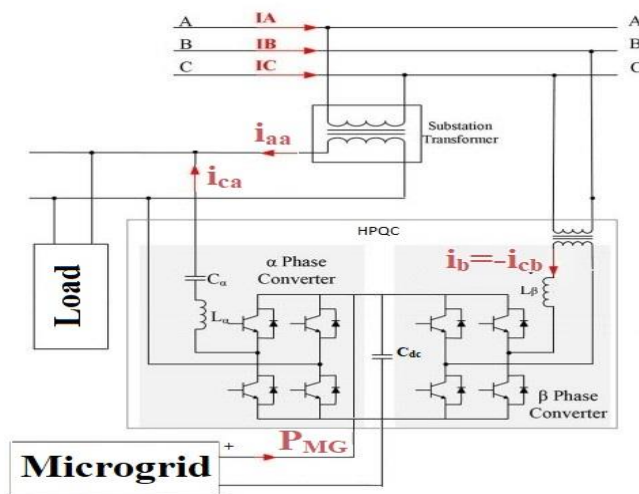
همچنین برای اثبات کاهش ظرفیت HPQC از طریق تعیین بهینه توان تزریق شده به لینک dc این سیستم در نرم افزار SIMULINK شبیه سازی شده است. پارامتر های شبیه سازی در جدول ۲ نشان داده شده است.

L_β	40mH
L_α	70mH
C_α	40 μ F
C_{dc}	10000 μ F
V_{dc}	30kV

جدول ۲. پارامتر های سیستم شبیه سازی شده توپولوژی سیستم شبیه سازی شده در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج شبیه سازی برای این سیستم در جدول ۳ نمایش داده شده است



شکل ۷. مقایسه شکل موج جریان های سیستم در عدم جبران سازی (بالا) و جبران سازی به همراه منابع تجدید پذیر (پایین)



شکل ۸. توپولوژی سیستم Co-Phase شبیه سازی شده

	without Comp			full Comp			Partial Comp			Partial Comp+MG		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
rms(A)	217.6	-	217.7	102.4	102.2	103.6	109.1	107.4	109.2	74.82	73.06	75.81
φ°	66	-	113	-1.8	-120	118	-19	-139	101	-20	-139	101
THD%	8.63	-	8.62	4.32	1.47	4.5	4.23	1.5	4.47	5.85	2.48	6.32
NSC%	100			1			1.1			2.2		
SHPQC (MVA)	-			23.35			21.2			19.28		

جدول ۳. نتایج شبیه سازی سیستم در نرم افزار SIMULINK

کاهش ظرفیت به علت کم شدن جریان جبران سازی مبدل فاز بتا (I_{cb}) می باشد چون بر طبق رابطه زیر ریز شبکه مقدار مورد نیاز جریان برای مبدل فاز آلفا را تغذیه کرده است و توان کمتری از فاز

bc کشیده شده است. به صورتی که در شکل ۸ نشان داده شده است با اضافه کردن ریز شبکه به سیستم ($t > 1.5$) جریان I_{ca} به مقدار کمی افزایش داشته ولی I_{cb} به شدت کاهش یافته است. برای شبیه سازی این سیستم ۴ حالت در نظر گرفته شده است:

(۱) شبیه سازی سیستم بدون هیچ جبران سازی
($0 < t < 0.5$)

(۲) شبیه سازی سیستم در حالت جبران سازی کامل و
عدم حضور ریز شبکه ($0.5 < t < 1$)

عملکرد سیستم از نظر کیفیت توانی رضایت بخش می باشد و تمامی پارامترهای در رنج استاندارد قرار دارند. همچنین با استفاده از ریز شبکه و جبران سازی جزئی توانستیم ظرفیت HPQC را به اندازه تقریباً ۲۰ درصد کاهش دهیم عملکرد جبران سازی جریان در شکل ۷ نشان داده شده است.

۵. جمع بندی

در این مقاله به بررسی ظرفیت HPQC به هنگام اتصال ریز شبکه به لینک dc جبران ساز استفاده شده در سیستم تراکشن Co-Phase پرداخته شد و اثبات شد که با استفاده از جبران سازی جزئی و انتخاب بهینه توان تغذیه شده از طریق ریز شبکه می توان ظرفیت HPQC را با استناد بر شبیه سازی های صورت گرفته در SIMULINK به مقدار تقریباً ۲۰ درصد کاهش داده دلیل این

۳) شبیه سازی سیستم در حالت جبران سازی جزئی و

عدم حضور ریز شبکه ($1 < t < 1.5$)

۴) شبیه سازی سیستم در حالت جبران سازی جزئی و

حضور ریز شبکه ($1.5 < t < 2$)

www.mhconf.ir

compensation'. Proc. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conf. (APPEEC), WuHan, P.R. China, March 2009, pp. 1–4

[^۸] Shu, Z., Xie, S., Li, Q.: 'Single-phase back-to-back converter for active power balancing, reactive power compensation and harmonic filtering in traction power system', IEEE Trans. Power Electron., 2011, 26, (2), pp. 334–343

[^۹] Shu, Z., Xie, S., Li, Q.: 'Single-phase back-to-back converter for active power balancing, reactive power compensation and harmonic filtering in traction power system', IEEE Trans. Power Electron., 2011, 26, (2), pp. 334–343

[^{۱۰}] Chen, M., Li, Q., Wei, G.: 'Optimized design and performance evaluation of new cophase traction power supply system'. Proc. AsiaPacific Power and Energy Engineering Conf. (APPEEC), WuHan, P.R. China, March 2009, pp. 1–6

[^{۱۱}] Shu, Z., Xie, S., Li, Q.: 'Development and implementation of a prototype for co-phase traction power supply system'. Proc. AsiaPacific

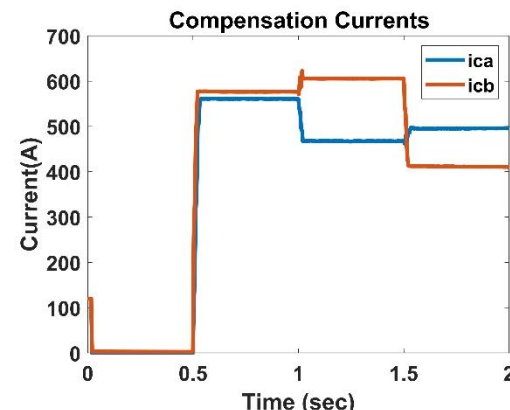
[^{۱۲}] Han, Z., Liu, S., Gao, S.: 'An automatic system for china high-speed multiple unit train running through neutral section with electric load'. Proc. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conf. (APPEEC), Chengdu, P.R. China, March 2010, pp. 1–3

[^{۱۳}] Chen, D., Pan, M., Tian, W., Yang, W.: 'Automatic neutral section passing control device based on image recognition for electric locomotives'. Proc. Int. Conf. Imaging Systems and Techniques (IST), Thessaloniki, Greece, July 2010, pp. 385–388

[^{۱۴}] K. Lao, M. Wong, N. Dai, C. Wong and C. Lam, "Analysis of DC-Link Operation Voltage of a Hybrid Railway Power Quality Conditioner and Its PQ Compensation Capability in High-Speed Cophase Traction Power Supply", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 2, pp. 1643-1656, 2016. Available: 10.1109/tpel.2015.2417356.

[^{۱۵}] K. Lao, N. Dai, W. Liu and M. Wong, "Hybrid Power Quality Compensator With Minimum DC Operation Voltage Design for High-Speed Traction Power Systems", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 4, pp. 2024-2036, 2013. Available: 10.1109/tpel.2012.2200909.

[^{۱۶}] Keng-Weng Lao; Man-Chung Wong; Ningyi Dai; Chi-Seng Lam; Lei Wang; Chi-Kong Wong, "Analysis of the Effects of Operation Voltage Range in Flexible DC Control on Railway HPQC Compensation Capability in High-Speed Co-phase Railway Power," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, vol: 33, issue: 2, pp: 1760–1774



شکل ۸. جریان های جبران سازی در حالات مختلف

۶. منابع

[^۱] Y. Jiang, J. Q. Liu, W. Tian, M. Shahidehpour, and M. Krishnamurthy, "Energy harvesting for the electrification of railway stations," *IEEE Electrification Magazine*, Sept. 2014, pp. 39–48.

[^۲] A. Gomez-Exposito, J. M. Mauricio, and J. M. Maza-Ortega, "VSC-based MVDC railway electrification system," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 29, No. 1, Feb. 2014, pp. 422–431.

[^۳] P-C. Tan, P.C. Loh, and D. G. Holmes, "Optimal impedance termination of 25-kV electrified railway systems for improved power quality," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 20, No. 2, pp. 1703–1710, Apr. 2005.

[^۴] S. T. Senini, and P. J. Wolfs, "Novel topology for correction of unbalanced load in single phase electric traction systems," in *PESC Rec. IEEE Annu. Power Electronics Specialists Conf.*, Vol. 3, Cairns, Australia, June 2002, pp. 1208–1212.

[^۵] Y. Q. Liu, H. S. Hua, G. P. Wu, and L. Wang, "Research for the effects of high-speed electrified railway traction load on power quality," in *Proc. of DRPT 2011*, pp. 569–573, 2011.

[^۶] Wei, Y.: 'Research on control of comprehensive compensation for traction substations based on the STATCOM technology'. PhD thesis, Tsinghua University,

[^۷] Zhou, F., Li, Q., Qiu, D.: 'Co-phased traction power system based on balanced transformer and hybrid

6th International Conference on the New Horizons in Electrical Engineering, Computer and Mechanical
[^{۱۷}] Keng-Weng Lao; Man-Chung Wong; NingYi Dai; Chi-Seng Lam; Chi-Kong Wong; Lei Wang, "Analysis in the Effect of Co-phase Traction Railway HPQC Coupled Impedance on Its Compensation Capability and Impedance-Mapping Design Technique Based on Required Compensation Capability for Reduction in Operation Voltage", 2017, vol: 32, issue: 4, pp: 2631–2646.

[^{۱۸}] M. Habibolahzadeh, H. Mahdinia Roudsari, A. Jalilian and S. Jamali, "Using C-type filter with partial compensation method for capacity reduction of hybrid power quality conditioner in co-phase traction power system", *IET Power Electronics*, vol. 14, no. 14, pp. 2350-2373, 2021. Available: 10.1049/pel2.12185.

[^{۱۹}] N. Y. Dai, M-C. Wong, K-W. Lao, and C-K. Wong, "Modelling and control of a railway power conditioner in co-phase traction power system under partial compensation," *IET Power Electronics*, Vol. 7, No. 5, pp. 1044–1054, May 2014.

[^{۲۰}] Gao, L., Yonghai, X., Xiangnin, X., Yingying, L., Peisi, J.: 'Analysis of adverse effects on the public power grid brought by traction powersupply system'. Proc. IEEE Electrical Power & Energy Conf., Canada, 2008, pp. 1 –7

[^{۲۱}] M. T. Haque, "Single-phase PQ theory," *2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings (Cat. No.02CH37289)*, doi: 10.1109/psec.2002.1023074.