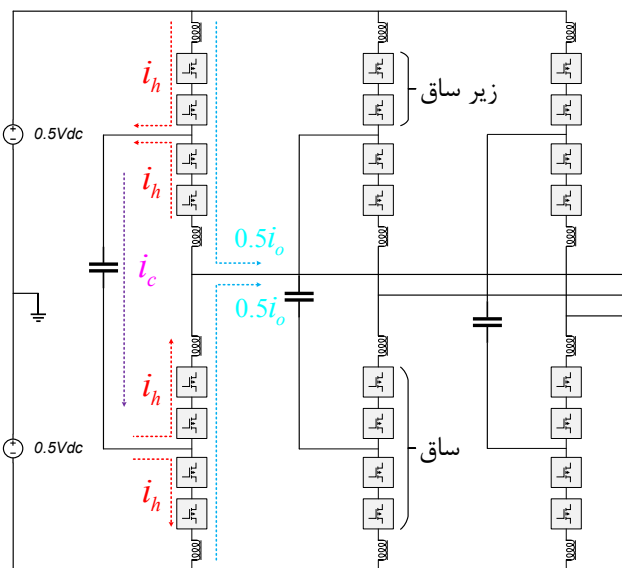


# کاهش تلفات الکتریکی مبدل چندسطحی مدولار خازن شناور در کاربرد محرکه الکتریکی

احمد باقری ملاحسنعلی و حسین ایمان عینی



شکل ۱: آرایش مبدل چندسطحی مدولار خازن شناور.

خروجی رابطه مستقیم و با فرکانس آن رابطه معکوس دارد. بنابراین در کاربردهایی که نیاز است تا موتور الکتریکی با گشتاور نامی راهاندازی شود، افزایش ریپل ولتاژ خازن سلول‌ها، استفاده از این مبدل را با چالش مواجه می‌کند [۸]. افزایش ریپل ولتاژ خازن سلول‌ها در فرکانس‌های کم و نزدیک به صفر را می‌توان با تزریق جریان چرخشی و ولتاژ مد مشترک فرکانس بالا در ساق‌های مبدل مهار کرد [۹] تا [۱۱]، اما ظهور ولتاژ مد مشترک در پایانه سه‌فاز موتور الکتریکی، تنش ولتاژ بر روی عایق سیم‌بندی موتور را افزایش داده و منجر به کاهش طول عمر آن می‌شود [۱۲] و [۱۳].

به منظور حذف ولتاژ مد مشترک در پایانه خروجی و عوارض جانبی زیان‌بار آن، پژوهشگران ساختارهای جدیدی مبتنی بر آرایش چندسطحی مدولار معرفی کرده‌اند [۱۴] تا [۲۰]. یکی از این ساختارها، مبدل چندسطحی مدولار خازن شناور است که در [۲۱] و [۲۲] معرفی شده است. این مبدل در مقایسه با دیگر آرایش‌های توسعه‌یافته از ساختار ساده‌تر و قابلیت اطمینان بیشتر برخوردار است [۲۲].

آرایش مبدل چندسطحی مدولار خازن شناور در شکل ۱ نشان داده شده است. در این مبدل در مقایسه با مبدل چندسطحی مدولار، یک خازن شناور، نقطه میانی ساق‌های بالا و پایین هر فاز را به هم متصل می‌کند و یک مسیر شارش توان را بین ساق‌ها به وجود می‌آورد. متعادل‌سازی توان بین ساق‌های بالا و پایین هر فاز که با تزریق جریان چرخشی فرکانس بالا به دست می‌آید، ریپل ولتاژ خازن سلول‌ها در فرکانس‌های کم و نزدیک به صفر را کاهش می‌دهد [۲۲]. هرچند در این

چکیده: مبدل چندسطحی مدولار خازن شناور به عنوان یک توسعه ساخت‌افزاری از مبدل چندسطحی مدولار مرسوم با هدف کاهش ریپل ولتاژ خازن سلول‌ها در کاربرد محرکه الکتریکی در سرعت‌های پایین معرفی شده است. ریپل ولتاژ خازن سلول‌ها در این مبدل تنها با تزریق جریان چرخشی فرکانس بالا میان ساق‌ها کاهش می‌یابد. در روش کنترل مرسوم این مبدل، مؤلفه جریان چرخشی با هدف جبران‌سازی کامل ریپل ولتاژ در فرکانس‌های پایین تزریق می‌شود که منجر به افزایش غیر ضروری دامنه جریان در ساق‌های مبدل می‌شود. در این مقاله با استخراج رابطه میان ریپل ولتاژ خازن سلول‌ها و دامنه جریان چرخشی فرکانس بالا، سیستم کنترل مبدل اصلاح می‌گردد. روش کنترل پیشنهادی قادر است تا با تزریق دامنه مناسب از جریان چرخشی، ریپل ولتاژ را در تمام بازه فرکانس به جای جبران‌سازی کامل، در یک محدوده مجاز کنترل کند. نشان داده می‌شود که با جبران‌سازی جزئی و کنترل ریپل ولتاژ خازن سلول‌ها در محدوده استاندارد ولتاژ کلیدهای قدرت، علاوه بر کاهش دامنه جریان ساق، تلفات محرکه الکتریکی به شکل قابل توجهی کاهش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی و آزمایش‌های عملی عملکرد موفق روش پیشنهادی را تصدیق می‌کند.

کلیدواژه: مبدل چندسطحی مدولار خازن شناور، مبدل چندسطحی مدولار، ریپل ولتاژ، محرکه الکتریکی ولتاژ متوسط.

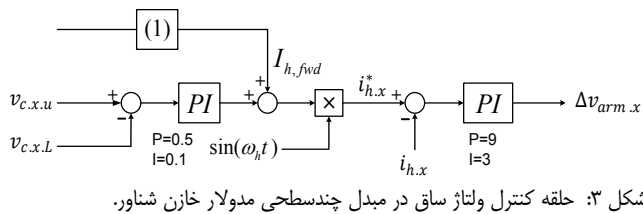
## ۱- مقدمه

مبدل چندسطحی مدولار، یک مبدل منبع ولتاژی توان بالا با خروجی چندسطحی است که از کلیدهای قدرت ولتاژ پایین بهره می‌برد. این مبدل ضمن برخورداری از مزایای مبدل‌های آشاری مثل مقیاس‌پذیری، تحمل‌پذیری خطا و قابلیت اطمینان زیاد، نیازی به منابع تغذیه مجزا و ترانسفورماتورهای جابه‌جاکننده فاز ندارد [۱] تا [۳]. ویژگی‌های منحصر به فرد این مبدل منجر به استفاده گسترده از آن در کاربردهای مختلف از جمله سیستم انتقال ولتاژ بالا (HVDC)، جبران‌سازهای سنکرون استاتیک (STATCOM) و بهساز یکپارچه کیفیت توان (UPQC) شده است. اما افزایش ریپل ولتاژ خازن سلول‌ها در فرکانس‌های کم و نزدیک به صفر در این مبدل، به کارگیری آن در کاربرد محرکه الکتریکی سرعت متغیر را با محدودیت مواجه کرده است [۴] تا [۷].

این مقاله در تاریخ ۲۵ بهمن ماه ۱۳۹۹ دریافت و در تاریخ ۲ تیر ماه ۱۴۰۰ بازنگری شد. این تحقیق توسط صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور پشتیبانی شده است.

احمد باقری ملاحسنعلی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، (email: ahmadbagheri@ut.ac.ir).

حسین ایمان عینی (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، (email: imaneini@ut.ac.ir).



شکل ۳: حلقه کنترل ولتاژ ساق در مبدل چندسطحی مدولار خازن شناور.

خروجی این سطوح کنترل  $(\Delta v_{ph,x}, \Delta v_{arm,x}, \Delta v_{x,i}, \Delta v_{x,i,j})$  با مرجع ولتاژ خروجی مبدل جمع شده و مرجع نهایی ولتاژ هر سلول را می‌سازند. در انتها فرمان گیت کلیدهای قدرت از روی مرجع ولتاژ سلول‌ها توسط مدولاسیون شیفت فاز (PS-PWM) ساخته می‌شود. استفاده از مدولاسیون شیفت فاز نه تنها به متعادل‌سازی ولتاژ خازن سلول‌ها کمک می‌کند بلکه تلفات الکتریکی کلیدهای قدرت در هر ساق نیز برابر خواهد بود [۲۲].

### ۲-۲ کنترل جریان فرکانس بالا

هدف اصلی کنترل ولتاژ ساق در مبدل چندسطحی مدولار خازن شناور، متعادل‌سازی توان بین ساق‌های بالا و پایین هر فاز مبدل است که منجر به کاهش ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها می‌شود [۲۱] و [۲۲]. بلوک دیاگرام حلقه کنترل ولتاژ ساق در شکل ۳ نشان داده است.

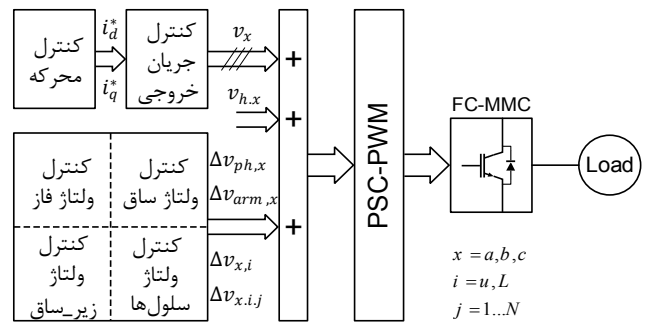
اختلاف میان ولتاژ متوسط ساق‌های بالا و پایین هر فاز مبدل  $(v_{c,x,u}, v_{c,x,l})$  توسط جبران‌ساز PI جبران می‌شود. خروجی این جبران‌ساز با مؤلفه ترم پیش‌خور  $(I_{h,fvd})$  جمع می‌شود. ترم پیش‌خور دامنه جریان فرکانس بالای مورد نیاز برای جبران‌سازی ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها را در فرکانس‌های کم و نزدیک به صفر می‌سازد. از جمع این دو مؤلفه، مرجع نهایی دامنه جریان چرخشی فرکانس بالا ساخته می‌شود. از ضرب مؤلفه نهایی به دست آمده در ترم سینوسی با فرکانس برابر با فرکانس جریان چرخشی فرکانس بالا  $\sin(\omega_h t)$ ، سیگنال مرجع جریان چرخشی  $(i_{h,x}^*)$  ساخته می‌شود. اختلاف میان مرجع جریان چرخشی فرکانس بالا و مقدار واقعی آن نیز توسط جبران‌ساز PI جبران می‌شود. خروجی این جبران‌ساز، مؤلفه ولتاژ ساق  $(\Delta v_{arm,x})$  را تولید می‌کند.

در [۲۱] و [۲۲]، مؤلفه پیش‌خور  $(I_{h,fvd})$  مربوط به حلقه کنترل ولتاژ ساق از روی (۱) طراحی می‌شود. این رابطه دامنه جریان فرکانس بالای مورد نیاز را برای جبران‌سازی کامل ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها در فرکانس‌های کم و نزدیک به صفر تولید می‌کند. جبران‌سازی کامل (یا حذف) ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها در فرکانس‌های کم، دامنه بسیار بزرگی از جریان چرخشی فرکانس بالا را به مبدل تحمیل می‌کند

$$I_{h,x} = \frac{0.725V_d i_x - v_x I_{d,x}}{0.725V_d + 0.5V_h} \times \frac{V_h}{0.725V_d} \quad (1)$$

برای درک بهتر از میزان جریان چرخشی فرکانس بالا در فرکانس‌های مختلف، محرکه چندسطحی مدولار خازن شناور (با مشخصات جدول ۱) در حالت گشتاور نامی، شبیه‌سازی گردید و نتیجه به دست آمده در شکل ۴ نشان داده شد. در این شکل، دامنه جریان چرخشی فرکانس بالا بر حسب دامنه جریان خروجی نرمالیزه شده است. همان‌طور که مشخص است، جبران‌سازی کامل ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها در فرکانس‌های کم و نزدیک به صفر دامنه بزرگی از جریان چرخشی فرکانس بالا را به مبدل تحمیل می‌کند.

اما به جای جبران‌سازی کامل ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها در فرکانس‌های کم و نزدیک به صفر، می‌توان ریبیل ولتاژ را با توجه به



شکل ۲: بلوک دیاگرام کنترل محرکه چندسطحی مدولار خازن شناور.

مبدل با حذف ولتاژ مد مشترک اثرات جانبی آن بر روی موتور الکتریکی از بین رفته است، اما بزرگ‌بودن دامنه جریان چرخشی فرکانس بالا در ساق‌های مبدل، نه تنها تنش جریان در ساق‌ها و جریان نامی اجزای مبدل را افزایش می‌دهد بلکه منجر به افزایش تلفات کلیدهای قدرت می‌شود.

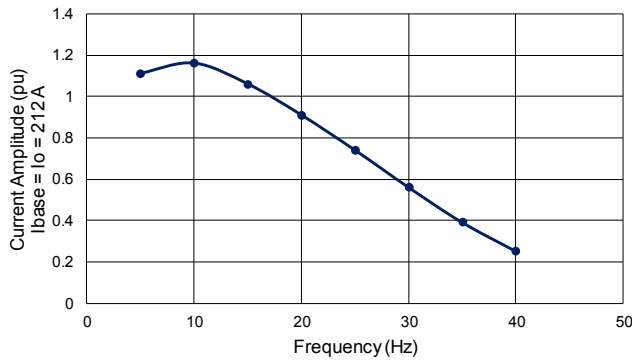
به منظور کاهش دامنه جریان چرخشی فرکانس بالا در مبدل چندسطحی مدولار خازن شناور، پژوهشگران در [۲۳] و [۲۴] تزریق جریان چرخشی فرکانس بالا با شکل موج مربعی (به جای جریان با شکل موج سینوسی) را پیشنهاد داده‌اند. پیاده‌سازی این روش، دامنه جریان چرخشی در ساق‌های مبدل را به ازای جبران‌سازی یکسان ریبیل ولتاژ (ریبیل برابر)، به میزان ۲۵ درصد کاهش می‌دهد. البته پیاده‌سازی این روش در عمل با مشکلات متعددی مانند بزرگ‌بودن  $di/dt$  و EMI مواجه است. عبور جریان با شکل موج مربعی از سلف‌های بازو، ولتاژ لحظه‌ای بزرگی را دو سر سلف‌ها به وجود می‌آورد که می‌تواند عملکرد صحیح مبدل و سیستم کنترل آن را مختل کند.

در این مقاله با استفاده از معادلات حاکم بر مبدل چندسطحی مدولار خازن شناور، رابطه بین ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها و دامنه جریان چرخشی فرکانس بالا استخراج می‌شود. به دست آوردن این رابطه از این جهت اهمیت دارد که می‌توان با تزریق مقدار مناسبی از جریان چرخشی در ساق‌های مبدل، ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها در فرکانس‌های کم و نزدیک به صفر را به جای جبران‌سازی کامل، در محدوده مجاز و قابل تحمل کلیدهای قدرت کنترل کرد. جبران‌سازی جزئی (کنترل‌شده) ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها (با توجه به ولتاژ قابل تحمل کلیدهای قدرت) به جای جبران‌سازی کامل، دامنه جریان چرخشی فرکانس بالا در ساق‌های مبدل را به شکل قابل توجهی کم می‌نماید.

### ۲- سیستم کنترل مبدل چندسطحی مدولار خازن شناور

#### ۲-۱ شمای کلی سیستم کنترل

بلوک دیاگرام نمای کلی کنترل مبدل چندسطحی مدولار خازن شناور در شکل ۲ نشان داده شده است. کنترل این مبدل در چندین سطح توسط حلقه‌های کنترلی مختلف انجام می‌شود که جزئیات کامل آن در [۲۱] و [۲۲] شرح داده شده است. به طور خلاصه، حلقه کنترل جریان، فرمان ولتاژ خروجی مبدل  $(v_x)$  را از روی مراجع جریان  $(i_d^*, i_q^*)$  تولید می‌کند. مراجع جریان نیز توسط حلقه کنترل محرکه فرمان داده می‌شود. همچنین مؤلفه ولتاژ فرکانس بالا  $(v_{h,x})$  از روی شاخص مدولاسیون  $(m)$  که از حلقه کنترل جریان به دست می‌آید، ساخته می‌شود. کنترل ولتاژ خازن سلول‌ها نیز در چهار سطح مختلف انجام می‌شود: کنترل ولتاژ فاز، کنترل ولتاژ ساق، کنترل ولتاژ زیر ساق و کنترل ولتاژ سلول‌ها. مؤلفه‌های ولتاژ



شکل ۴: دامنه جریان چرخشی فرکانس بالا در محرکه چندسطحی مدولار خازن شناور.

$$I_h = \alpha \times I_o \quad (4)$$

با فرض متعادل بودن ولتاژ خازن سلول‌ها، (۵)، ولتاژ خازن سلول‌ها را نشان می‌دهد که در آن  $A$  دامنه مؤلفه ac ولتاژ است

$$V_c = \frac{U_{dc}}{N} + A \cos(\omega_o t) \quad (5)$$

$$\frac{dE_c}{dt} = C \times V_c(t) \times \frac{dV_c(t)}{dt} \quad (6)$$

با جایگذاری (۵) در (۶) که توان لحظه‌ای خازن را بر حسب ولتاژ آن نشان می‌دهد، رابطه توان لحظه‌ای خازن سلول‌ها به دست می‌آید

$$\begin{aligned} \frac{dE_c}{dt} &= C \left[ \frac{U_{dc}}{N} + A \cos(\omega_o t) \right] [-A \cos(\omega_o t)] \\ &= -AC\omega_o \frac{U_{dc}}{N} \sin(\omega_o t) - \frac{1}{2} A^2 C \omega_o \sin(2\omega_o t) \end{aligned} \quad (7)$$

مؤلفه دوم (۷) به اندازه کافی از مؤلفه اول آن کوچک‌تر است که بتوان از آن صرف نظر کرد. همچنین اگر از تلفات کلیدهای قدرت در سلول‌ها صرف نظر کنیم، رابطه توان لحظه‌ای هر سلول طبق (۸) به دست می‌آید

$$\frac{dE_{SM}}{dt} = -AC\omega_o \frac{U_{dc}}{N} \sin(\omega_o t) \quad (8)$$

با توجه به محاسبات انجام گرفته در [۲۱] و [۲۲]، رابطه توان لحظه‌ای هر ساق را به صورت زیر می‌توان نوشت

$$\frac{dE_{arm}}{dt} = -\frac{1}{4} U_{dc} i_o + v_o I_{dc} + V_h I_h \sin(\omega_o t) \quad (9)$$

هر ساق از  $N$  سلول تشکیل می‌شود، بنابراین

$$\frac{dE_{arm}}{dt} = N \times \frac{dE_{SM}}{dt} \quad (10)$$

با جایگذاری (۳) و (۴) داخل (۹) و نتیجه به دست آمده به همراه (۸) داخل (۱۰) و ساده‌سازی نتیجه حاصل شده، (۱۱) به دست می‌آید

$$-AC\omega_o = -\frac{1}{4} I_o + \frac{m}{2} I_{dc} + \frac{1-m}{4} \alpha \times I_o \quad (11)$$

با صرف نظر کردن از تلفات محرکه الکتریکی، توان ورودی محرکه با توان خروجی آن برابر خواهد بود، بنابراین داریم

$$3U_{dc} I_{dc} = \frac{3}{2} V_o I_o \quad (12)$$

با جایگذاری (۳) داخل (۱۲)، رابطه بین جریان DC و دامنه جریان خروجی به دست می‌آید

جدول ۱: مشخصات محرکه الکتریکی شبیه‌سازی شده.

پارامترهای مبدل	
۷۰۰۰	ولتاژ لینک DC (V)
۴۱۶۰	ولتاژ نامی خط (V)
۱۵۰	جریان نامی (A)
۵۰	فرکانس نامی (Hz)
۲	سلف بازو (mH)
۸	تعداد سلول‌ها در هر ساق
۹	تعداد سطوح ولتاژ خروجی
۴۱۰۰	ظرفیت خازن سلول‌ها (μF)
۸۷۵	ولتاژ نامی خازن سلول‌ها (V)
۴۰۰	ظرفیت خازن شناور (μF)
۱۰۰۰	فرکانس موج حامل (Hz)
۱۸۰	فرکانس مؤلفه فرکانس بالا (Hz)
پارامترهای موتور الکتریکی	
۱۲۵۰	توان خروجی (hp)
۴۱۶۰	ولتاژ نامی خط (V)
۱۵۰	جریان نامی (A)
۵۰	فرکانس نامی (Hz)
۱۱۸۹	سرعت نامی (rpm)
۷۴۹۰	گشتاور نامی (N.m)
۶	تعداد قطب
۴۷٫۶	ممان اینرسی (kg.m <sup>۲</sup> )

حداکثر ولتاژ قابل تحمل (یا مجاز) کلیدهای قدرت، محدود و کنترل کرد. این ایده با تزریق دامنه کمتری از جریان چرخشی فرکانس بالا در ساق‌های مبدل انجام می‌شود. برای پیاده‌سازی این ایده ابتدا باید رابطه بین ریپل ولتاژ خازن سلول‌ها و دامنه جریان چرخشی فرکانس بالا در مبدل چندسطحی مدولار خازن شناور استخراج شود.

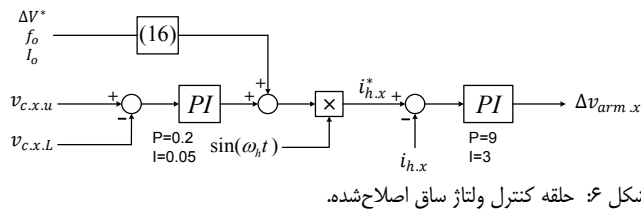
### ۳- روش پیشنهادی کنترل ریپل ولتاژ خازن سلول‌ها

#### ۳-۱- رابطه بین ریپل ولتاژ خازن سلول‌ها و دامنه جریان چرخشی فرکانس بالا

برای به دست آوردن رابطه بین ریپل ولتاژ خازن سلول‌ها و دامنه جریان چرخشی فرکانس بالا، ابتدا باید رابطه توان لحظه‌ای هر سلول و ساق مبدل محاسبه شود. با توجه به روابط موجود در [۲۱] و [۲۲]، تعاریف مؤلفه‌های خروجی و فرکانس بالای ولتاژ و جریان در (۲) ارائه شده است. مقدار دامنه مؤلفه‌های خروجی و فرکانس بالای ولتاژ در (۳) نشان داده شده است. به منظور ساده‌سازی محاسبات پیش رو، دامنه جریان چرخشی فرکانس بالا بر حسب دامنه جریان خروجی در (۴) تعریف شده است

$$\begin{cases} i_o = I_o \sin(\omega_o t + \theta_x) \\ i_h = I_h \sin(\omega_o t + \theta_x) \sin(\omega_h t) \\ v_o = V_o \sin(\omega_o t + \theta_x + \delta) \\ v_h = V_h \sin(\omega_h t) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} V_o = m \times \frac{U_{dc}}{2} \\ V_h = (1-m) \times \frac{U_{dc}}{4} \end{cases} \quad (3)$$



#### ۴- شبیه‌سازی روش پیشنهادی

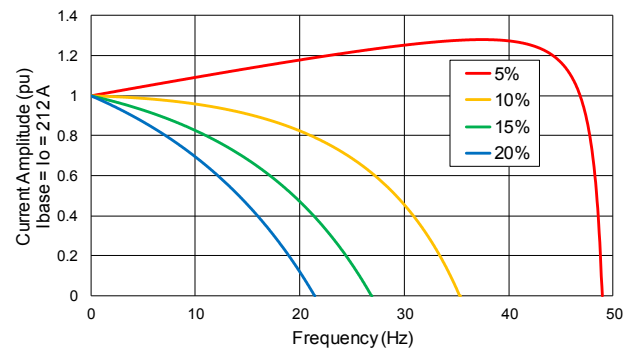
به منظور تصدیق عملکرد روش کنترل پیشنهادی در کاهش دامنه جریان چرخشی فرکانس بالا در مبدل چندسطحی مدولار خازن شناور، یک مدل شبیه‌سازی از محرکه الکتریکی فوق با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ در محیط نرم‌افزار Matlab/Simulink پیاده‌سازی شده است. با پیاده‌سازی روش کنترل مرسوم و پیشنهادی می‌توان میزان کاهش دامنه جریان چرخشی فرکانس بالا و جریان ساق را به دست آورد. شبیه‌سازی‌ها برای بازه فرکانس صفر تا نامی و به ازای جریان خروجی نامی ۱۵۰ آمپر مؤثر انجام شده است. فرکانس خروجی در شبیه‌سازی‌های انجام شده از صفر تا ۵۰ هرتز با شیب ثابت افزایش می‌یابد.

در شکل‌های ۷ و ۸ نتیجه شبیه‌سازی محرکه الکتریکی فوق با روش کنترل مرسوم آمده است. همان‌طور که شکل ۷ نشان می‌دهد، علی‌رغم جبران‌سازی کامل ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها در فرکانس‌های پایین و نزدیک به صفر، ریبیل ولتاژ در فرکانس‌های بالاتر تا مقدار ۱۰۰ ولت (۱۱/۴٪) افزایش می‌یابد. دامنه جریان چرخشی در فرکانس‌های پایین و نزدیک به صفر در این روش برابر با ۲۴۵ آمپر بوده و دامنه جریان ساق نیز ۳۶۵ آمپر است. با توجه به تقسیم جریان خروجی بین ساق‌های بالا و پایین هر فاز، سهم جریان خروجی از جریان ساق تقریباً ۱۰۶ آمپر است که در مقایسه با ۳۶۵ آمپر به دست آمده نشان می‌دهد که روش کنترل مرسوم تا ۳/۵ برابر، دامنه جریان در ساق‌های مبدل را افزایش می‌دهد.

در شکل ۹ نتیجه شبیه‌سازی روش کنترل پیشنهادی با محدوده ریبیل ولتاژ ۱۰ درصد ( $\Delta V^* = 10\%$ ) نشان داده شده است. عملکرد موفق روش کنترل پیشنهادی در محدود کردن ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها در محدوده مجاز ولتاژ ( $\Delta V^* = 10\%$ ) که با تزریق دامنه مناسب از جریان چرخشی فرکانس بالا در ساق‌های مبدل به دست می‌آید، در این شکل نشان داده شده است. دامنه جریان چرخشی در فرکانس‌های کم در این شکل برابر با ۲۱۵ آمپر و دامنه جریان ساق برابر با ۳۴۰ آمپر است.

در شکل ۱۰ محدوده ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها در شبیه‌سازی روش پیشنهادی تا ۲۰ درصد افزایش یافته است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، به منظور جبران‌سازی ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها در محدوده ۲۰ درصد، تنها تا فرکانس ۲۵ هرتز (زمان ۰/۵ ثانیه) به تزریق جریان چرخشی فرکانس بالا نیاز است و در فرکانس‌های بالاتر، نیازی به تزریق جریان چرخشی نیست. دامنه جریان چرخشی در فرکانس‌های پایین در این شکل برابر با ۲۰۵ آمپر و دامنه جریان ساق برابر با ۳۲۵ آمپر است.

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی و (۱۶) که رابطه میان ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها و دامنه جریان چرخشی فرکانس بالا را به نحوی اصلاح نمود که با تزریق جریان چرخشی فرکانس بالا با دامنه مناسب در ساق‌های مبدل، ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها را در محدوده مجاز کنترل کرد. برای این منظور مطابق شکل ۶، مؤلفه پیش‌خور حلقه کنترل ولتاژ ساق بر اساس (۱۶) اصلاح می‌گردد. به عبارتی بر اساس دامنه و فرکانس جریان خروجی محرکه الکتریکی ( $f_o, I_o$ ) و محدوده مجاز ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها ( $\Delta V^*$ )، دامنه مناسب از جریان چرخشی فرکانس بالا محاسبه و در ساق‌های مبدل تزریق می‌شود تا ریبیل ولتاژ در محدوده مورد نظر قرار بگیرد.



شکل ۵: دامنه جریان فرکانس بالای مورد نیاز با توجه به ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها.

$$I_{dc} = \frac{m}{\sqrt{3}} I_o \quad (13)$$

با استفاده از (۱۳)، (۱۱) را می‌توان به صورت زیر ساده‌سازی کرد

$$A = \frac{I_o}{\sqrt{3} C \omega_o} \left[ 1 - \frac{m^2}{2} - (1-m)\alpha \right] \quad (14)$$

معادله (۱۴) رابطه بین دامنه مؤلفه ac ولتاژ خازن سلول‌ها ( $A$ ) و دامنه نرمالیزه شده جریان چرخشی فرکانس بالا ( $\alpha$ ) را نشان می‌دهد.

دامنه مورد نیاز جریان چرخشی فرکانس بالا ( $I_h$ ) برای داشتن ریبیل ولتاژ مشخص به میزان ( $\Delta V$ ) را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد

$$\Delta V = 2 \times A \quad (15)$$

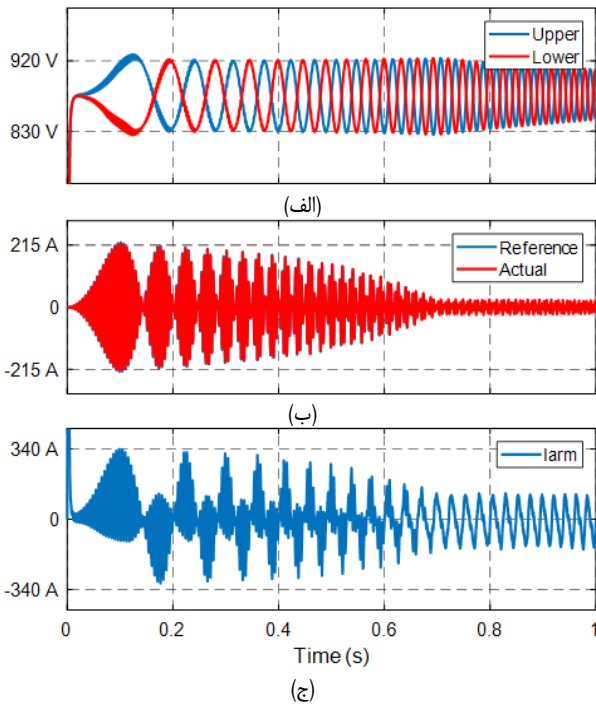
$$I_h = \frac{1}{1-m} \left[ \left(1 - \frac{m^2}{2}\right) \times I_o - \sqrt{3} C \omega_o \times \Delta V \right] \quad (16)$$

برای درک بهتر از میزان جریان چرخشی فرکانس بالای مورد نیاز در روش پیشنهادی، رابطه بین دامنه نرمالیزه شده جریان چرخشی فرکانس بالا و ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها به ازای فرکانس‌های مختلف در محرکه چندسطحی مدولار خازن شناور (و بر اساس مشخصات جدول ۱) استخراج و در شکل ۵ نشان داده می‌شود.

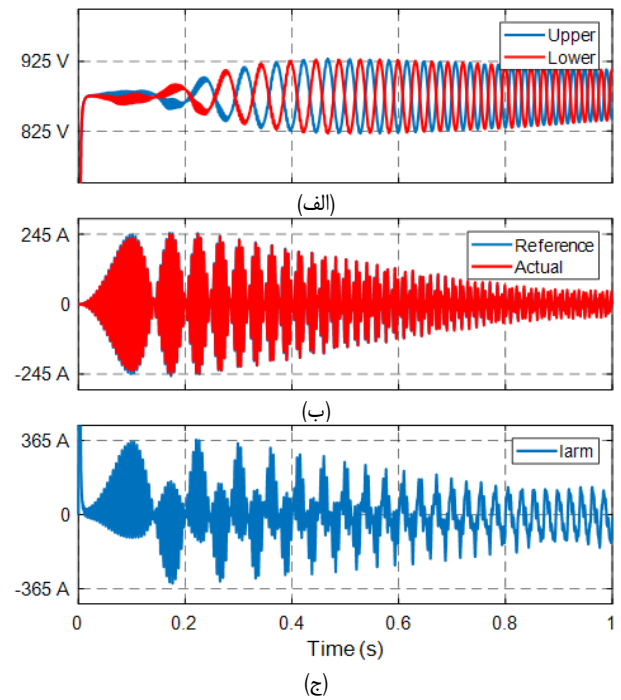
همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد، برای جبران‌سازی بیشتر ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها (معادل با درصد ریبیل کمتر)، به دامنه بزرگ‌تری از جریان چرخشی فرکانس بالا نیاز است که نتیجه آن بزرگ‌تر شدن دامنه جریان در ساق‌های مبدل است. اما اگر اجازه داده شود که ریبیل ولتاژ در فرکانس‌های کم، دامنه بزرگ‌تری داشته باشد (مثلاً ۲۰ درصد) و در عین حال قله ولتاژ خازن در محدوده قابل تحمل (یا مجاز) کلیدهای قدرت باشد، دامنه جریان نهایی در ساق‌های مبدل کم شده و تلفات کمتری در مبدل خواهیم داشت.

#### ۳-۲ پیاده‌سازی روش کنترل پیشنهادی

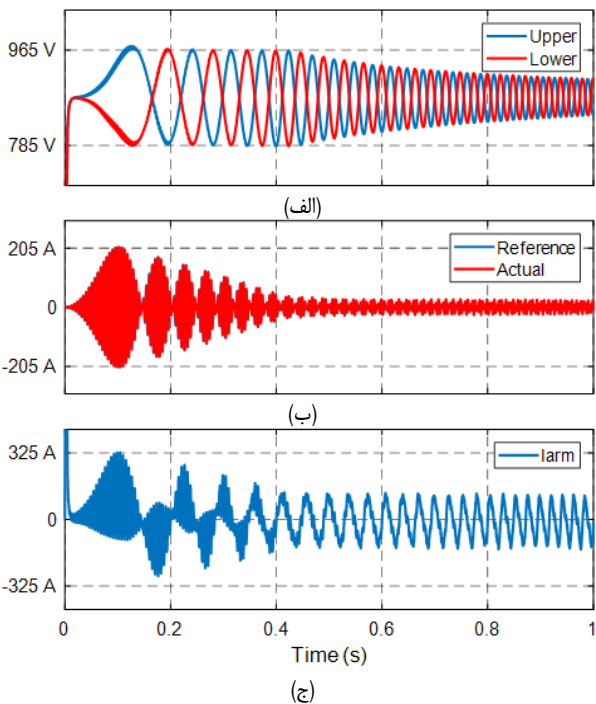
با به دست آوردن رابطه میان ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها و دامنه جریان چرخشی فرکانس بالا در مبدل چندسطحی مدولار خازن شناور، می‌توان حلقه کنترل ولتاژ ساق را به نحوی اصلاح نمود که با تزریق جریان چرخشی فرکانس بالا با دامنه مناسب در ساق‌های مبدل، ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها را در محدوده مجاز کنترل کرد. برای این منظور مطابق شکل ۶، مؤلفه پیش‌خور حلقه کنترل ولتاژ ساق بر اساس (۱۶) اصلاح می‌گردد. به عبارتی بر اساس دامنه و فرکانس جریان خروجی محرکه الکتریکی ( $f_o, I_o$ ) و محدوده مجاز ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها ( $\Delta V^*$ )، دامنه مناسب از جریان چرخشی فرکانس بالا محاسبه و در ساق‌های مبدل تزریق می‌شود تا ریبیل ولتاژ در محدوده مورد نظر قرار بگیرد.



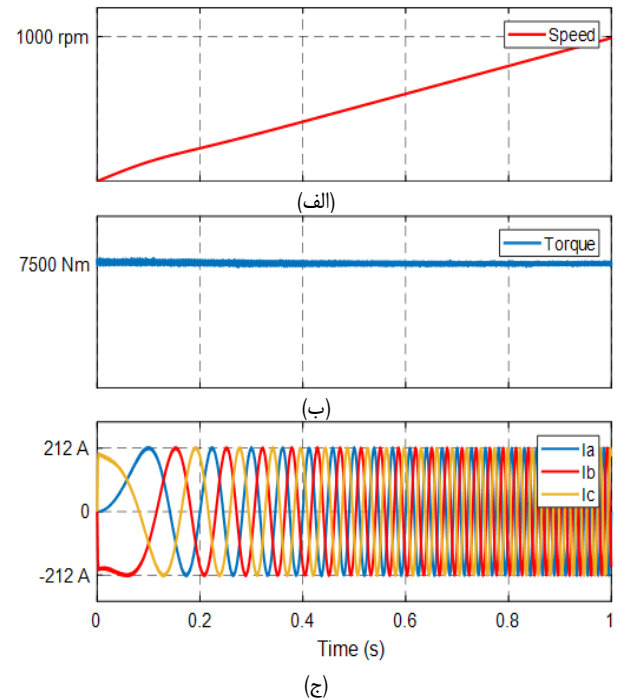
شکل ۹: نتایج شبیه‌سازی محرکه چندسطحی مدولار خازن شناور با روش کنترل پیشنهادی با ریبیل ولتاژ ۱۰٪، (الف) ولتاژ خازن سلول‌های یک فاز، (ب) جریان چرخشی فرکانس بالا و (ج) جریان ساق.



شکل ۷: نتایج شبیه‌سازی روش کنترل مرسوم محرکه چندسطحی مدولار خازن شناور، (الف) ولتاژ خازن سلول‌های یک فاز، (ب) جریان چرخشی فرکانس بالا و (ج) جریان ساق.



شکل ۱۰: نتایج شبیه‌سازی محرکه چندسطحی مدولار خازن شناور با روش کنترل پیشنهادی با ریبیل ولتاژ ۲۰٪، (الف) ولتاژ خازن سلول‌های یک فاز، (ب) جریان چرخشی فرکانس بالا و (ج) جریان ساق.

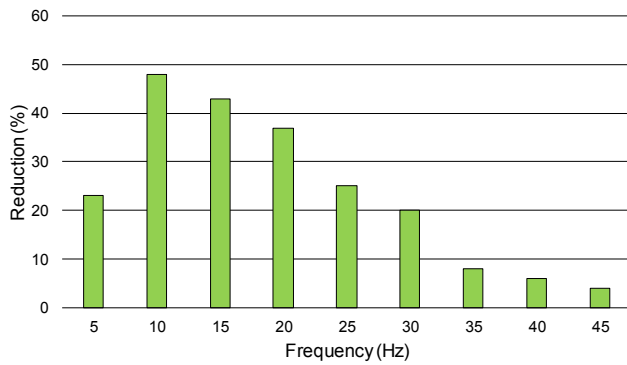


شکل ۸: نتایج شبیه‌سازی روش کنترل مرسوم محرکه چندسطحی مدولار خازن شناور، (الف) سرعت موتور الکتریکی، (ب) گشتاور الکترومغناطیسی مبدل و (ج) جریان سه‌فاز خروجی.

روش پیشنهادی نیز به ترتیب برابر با ۵۸ و ۲۷ درصد است. شایان ذکر است که با بزرگ‌تر کردن محدوده ریبیل ولتاژ در روش پیشنهادی، میزان کاهش دامنه جریان نیز افزایش می‌یابد.

کاهش دامنه جریان ساق علاوه بر کاهش جریان نامی اجزای مبدل از جمله کلیدهای قدرت و سلف‌های بازو، تلفات الکتریکی کلیدهای قدرت را نیز کاهش می‌دهد. به منظور مطالعه تلفات کلیدهای قدرت و بررسی میزان کاهش تلفات در روش کنترل پیشنهادی، ابتدا باید جریان‌های مؤثر

مقایسه دامنه جریان چرخشی و ساق به دست آمده از شبیه‌سازی روش کنترل مرسوم در شکل ۷ و روش پیشنهادی با ریبیل ولتاژ ۲۰ درصد در شکل ۱۰ به ازای فرکانس‌های مختلف در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های مشابه قادر است تا بدون تحمیل جریان با شکل موج مربعی و مشکلات ناشی از بزرگ‌بودن  $di/dt$ ، دامنه جریان چرخشی و ساق را به ترتیب تا ۸۵ و ۴۵ درصد در فرکانس‌های ۲۰ و ۲۵ هرتز (زمان‌های ۰/۴ و ۰/۵ ثانیه) کاهش دهد. متوسط کاهش دامنه جریان چرخشی و ساق در



شکل ۱۴: میزان کاهش تلفات با به کارگیری روش کنترل پیشنهادی نسبت به روش کنترل قدیمی (مرسوم).

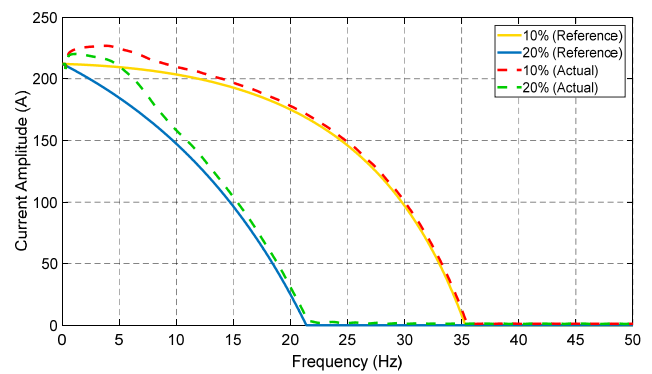
جدول ۲: مشخصات محرکه الکتریکی در آزمایش عملی.

پارامترهای مبدل	
۲۴۰	ولتاژ لینک DC (V)
۸۵	ولتاژ فاز (V)
۳	جریان خروجی (A)
۵۰	فرکانس نامی (Hz)
۲	سلف بازو (mH)
۴	تعداد سلول‌ها در هر ساق
۵	تعداد سطوح ولتاژ خروجی
۳۲۰۰	ظرفیت خازن سلول‌ها ( $\mu\text{F}$ )
۶۰	ولتاژ خازن سلول‌ها (V)
۴۲۰	ظرفیت خازن شناور ( $\mu\text{F}$ )
۱۰۰۰	فرکانس موج حامل (Hz)
۱۸۰	فرکانس مؤلفه فرکانس بالا (Hz)
پارامترهای موتور الکتریکی	
۰٫۵	توان نامی (hp)
۲۲۰	ولتاژ نامی فاز (V)
۳٫۵	جریان نامی (A)
۰٫۹	ضریب توان

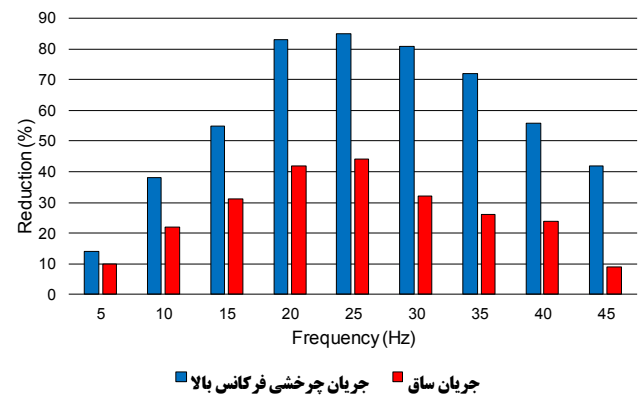
## ۵- پیاده‌سازی عملی

برای ارزیابی عملی روش کنترل پیشنهادی در کاهش دامنه جریان چرخشی فرکانس بالا در محرکه چندسطحی مدولار خازن شناور، یک نمونه آزمایشگاهی ولتاژ پایین از محرکه فوق در محیط آزمایشگاه پیاده‌سازی شده است (شکل ۱۵). این نمونه آزمایشگاهی شامل یک مبدل چندسطحی مدولار خازن شناور تک‌فاز با مدار کنترل مبتنی بر پردازنده TMS۳۲۰F۲۸۳۳۵، یک مدار اندازه‌گیری جریان خازن شناور و یک موتور القایی تک‌فاز دایم به عنوان بار می‌باشد که مشخصات آنها در جدول ۲ ارائه شده است.

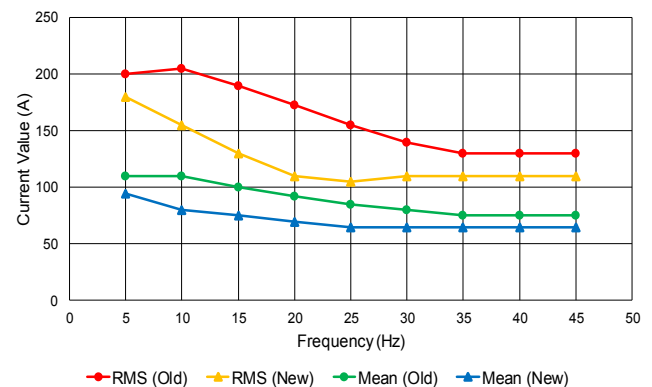
به منظور بررسی عملکرد روش کنترل پیشنهادی، آزمایش‌های عملی در دو فرکانس ۵ و ۱۰ هرتز و به ازای مقادیر مختلف محدوده ریبیل ولتاژ انجام شده است. در شکل‌های ۱۶ تا ۱۹ ترم ac ولتاژ خازن سلول‌های یک فاز ( $V_c$ )، جریان خروجی ( $I_o$ ) و جریان عبوری از خازن شناور ( $I_c$ ) که معادل دو برابر جریان چرخشی فرکانس بالا است به ترتیب نشان داده شده است. جریان مؤثر خروجی در همه آزمایش‌ها برابر با ۳ آمپر است.



شکل ۱۱: مقایسه منحنی دامنه جریان چرخشی فرکانس بالا در حالت تئوری و شبیه‌سازی.



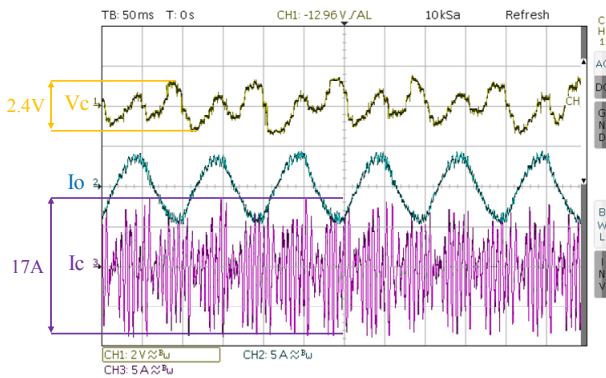
شکل ۱۲: میزان کاهش دامنه جریان چرخشی و ساق با به کارگیری روش کنترل پیشنهادی.



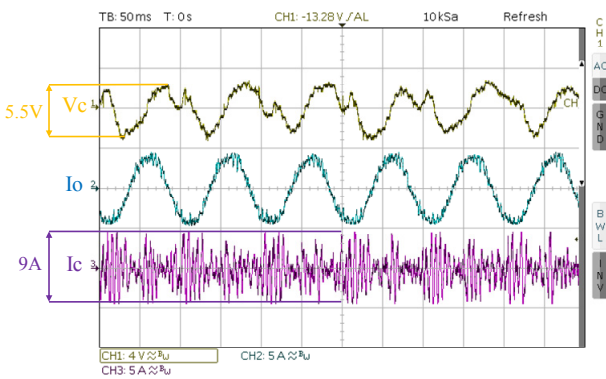
شکل ۱۳: جریان‌های مؤثر و متوسط عبوری از یک ساق مبدل با روش کنترل جدید و قدیمی.

و متوسط عبوری از کلیدهای قدرت را محاسبه کرد. در شکل ۱۳ جریان‌های مؤثر و متوسط عبوری از یک ساق مبدل با روش کنترل مرسوم و جدید نشان داده شده است. همان طور که این شکل نشان می‌دهد، روش کنترل پیشنهادی قادر است تا مقدار مؤثر و متوسط جریان عبوری از ساق‌های مبدل را به شکل قابل توجهی کاهش دهد.

با استفاده از مدل دقیق کلیدهای قدرت و پیاده‌سازی آن در محیط شبیه‌سازی، می‌توان تلفات کلیدها اعم از تلفات هدایتی و کلیدزنی را محاسبه کرد. در شکل ۱۴ میزان کاهش تلفات الکتریکی کلیدهای قدرت با به کارگیری روش کنترل پیشنهادی نشان داده شده است. همان طور که این شکل نشان می‌دهد، روش پیشنهادی قادر است تا تلفات الکتریکی کلیدها را تا ۵۰ درصد در فرکانس ۱۰ هرتز کاهش دهد. متوسط کاهش تلفات الکتریکی نیز تقریباً ۲۵ درصد است.



شکل ۱۸: نتایج آزمایش عملی در فرکانس ۱۰ هرتز و ریبیل ولتاژ ۵٪.



شکل ۱۹: نتایج آزمایش عملی در فرکانس ۱۰ هرتز و ریبیل ولتاژ ۱۰٪.

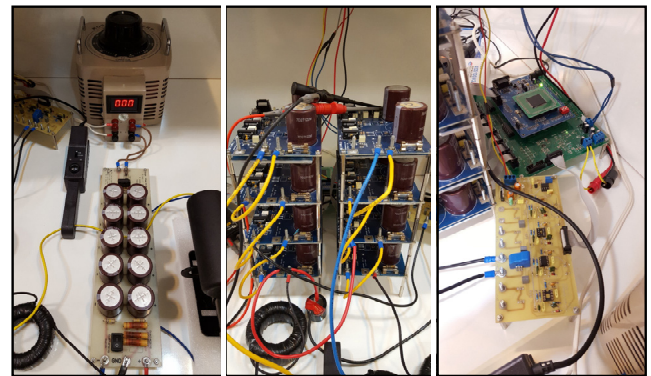
### ۶- نتیجه گیری

مبدل چندسطحی مدولار خازن شناور به عنوان یک مبدل پیشرفته به منظور بهبود عملکرد محرکه چندسطحی مدولار در فرکانس‌های کم معرفی شده است. اما بزرگ‌بودن دامنه جریان چرخشی فرکانس‌بالا در ساق‌های این مبدل، دامنه جریان ساق را تا ۳/۵ برابر افزایش می‌دهد که می‌تواند منجر به افزایش قابل توجه تلفات الکتریکی کلیدهای قدرت شود. در این مقاله با استخراج رابطه میان ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها و دامنه جریان چرخشی فرکانس‌بالا و به دنبال آن اصلاح سیستم کنترل مبدل، جریان چرخشی فرکانس‌بالا به شکل بهینه در ساق‌های مبدل تزریق می‌شود تا ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها در فرکانس‌های کم به جای جبران‌سازی کامل، در محدوده قابل تحمل (مجاز) کلیدهای قدرت قرار بگیرد. روش کنترل پیشنهادی قادر است تا ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها را در تمام بازه فرکانس در یک محدوده مشخص کنترل کند. نشان داده شد که روش کنترل پیشنهادی و جبران‌سازی جزئی ریبیل ولتاژ در مقایسه با روش کنترل قدیمی (یا مرسوم) قادر است تا دامنه جریان چرخشی و ساق را به طور متوسط به ترتیب به میزان ۵۸ و ۲۷ درصد کاهش دهد. همچنین تلفات الکتریکی کلیدهای قدرت نیز به طور متوسط به میزان ۲۵ درصد کاهش می‌یابد.

### مراجع

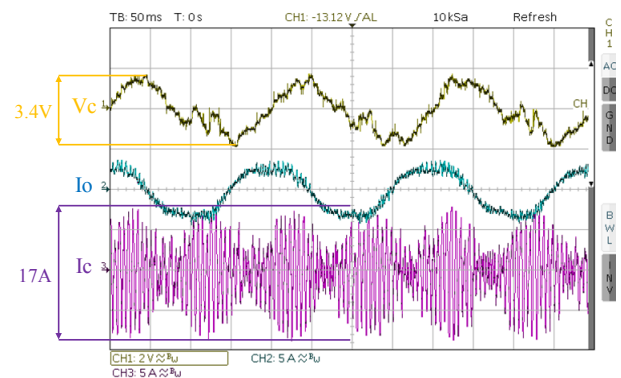
[1] S. Debnath, J. Qin, B. Bahrani, M. Saadedifard, and P. Barbosa, "Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: a review," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 1, pp. 37-53, Jan. 2015.

[2] A. Dekka, B. Wu, R. L. Fuentes, M. Perez, and N. R. Zargari, "Evolution of topologies, modeling, control schemes, and applications of modular multilevel converters," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 5, no. 4, pp. 1631-1656, Dec. 2017.

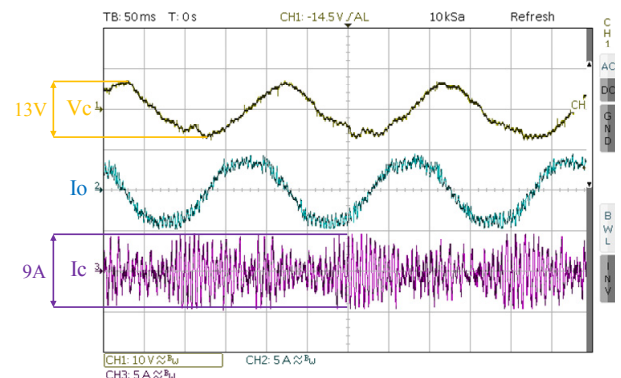


(الف) (ب) (ج)

شکل ۱۵: محرکه پیاده‌سازی شده در آزمایشگاه، (الف) برد کنترل و برد اندازه‌گیری جریان چرخشی، (ب) مبدل چندسطحی مدولار خازن شناور و (ج) اتوترانسفورمر و یکسوساز ورودی.



شکل ۱۶: نتایج آزمایش عملی در فرکانس ۵ هرتز و ریبیل ولتاژ ۵٪.



شکل ۱۷: نتایج آزمایش عملی در فرکانس ۵ هرتز و ریبیل ولتاژ ۲۰٪.

در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ فرکانس جریان خروجی محرکه الکتریکی برابر با ۵ هرتز و ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها به ترتیب در ۳/۴ و ۱۳ ولت (تقریباً ۵ و ۲۰ درصد ولتاژ نامی کلیدهای قدرت) کنترل شده است. دامنه جریان عبوری از خازن شناور در این دو شکل نشان می‌دهد که با افزایش ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها از ۵ به ۲۰ درصد، دامنه جریان چرخشی تزریق شده در ساق‌های مبدل به شکل قابل توجهی (۴۷٪) کاهش می‌یابد.

در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نیز فرکانس جریان خروجی محرکه الکتریکی برابر با ۱۰ هرتز و ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها به ترتیب در ۲/۴ و ۵/۵ ولت (تقریباً ۵ و ۱۰ درصد ولتاژ نامی کلیدهای قدرت) کنترل شده است. از مقایسه دامنه جریان عبوری از خازن شناور در این دو شکل نیز می‌توان دریافت که افزایش ریبیل ولتاژ خازن سلول‌ها از ۵ به ۱۰ درصد در فرکانس کاری ۱۰ هرتز در محرکه الکتریکی آزمایشگاهی، دامنه جریان چرخشی در ساق‌های مبدل را به میزان ۴۷ درصد کاهش می‌دهد.

- without common-mode voltage injected," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 3, pp. 2236-2246, Mar. 2019.
- [17] S. Du, B. Wu, K. Tian, N. R. Zargari, and Z. Cheng, "An active cross-connected modular multilevel converter (AC-MMC) for a medium-voltage motor drive," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 8, pp. 4707-4717, Aug. 2016.
- [18] S. Du, B. Wu, and N. R. Zargari, "A star-channel modular multilevel converter for zero/low-fundamental-frequency operation without injecting common-mode voltage," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 4, pp. 2857-2865, Apr. 2018.
- [19] S. Du, B. Wu, and N. R. Zargari, "A delta-channel modular multilevel converter for zero/low-fundamental-frequency operation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 3, pp. 2227-2235, Mar. 2019.
- [20] S. Du, B. Wu, and N. Zargari, "Delta-channel modular multilevel converter for a variable-speed motor drive application," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 8, pp. 6131-6139, Aug. 2018.
- [21] S. Du, B. Wu, N. R. Zargari, and Z. Cheng, "A flying-capacitor modular multilevel converter for medium-voltage motor drive," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 3, pp. 2081-2089, Mar. 2016.
- [22] S. Du, A. Dekka, B. Wu, and N. Zargari, *Modular Multilevel Converters: Analysis, Control, and Applications*, John Wiley & Sons, 2017.
- [23] S. Du, B. Wu, and N. R. Zargari, "Current stress reduction for flying-capacitor modular multilevel converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 1, pp. 184-191, Jan. 2019.
- [24] D. Dung Le and D. C. Lee, "Reduction of half-arm current stresses and flying-capacitor voltage ripples of flying-capacitor MMCs," *Access IEEE*, vol. 8, pp. 180076-180086, 2020.
- [3] F. Deng, Y. Lu, C. Liu, Q. Heng, Q. Yu, and J. Zhao, "Overview on submodule topologies, modeling, modulation, control schemes, fault diagnosis, and tolerant control strategies of modular multilevel converters," *Chin. J. Elect. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 1-21, Mar. 2020.
- [4] B. Li, S. Zhou, D. Xu, S. J. Finney, and B. W. Williams, "A hybrid modular multilevel converter for medium-voltage variable-speed motor drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 6, pp. 4619-4630, Jun. 2016.
- [5] Y. S. Kumar and G. Poddar, "Control of medium-voltage AC motor drive for wide speed range using modular multilevel converter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 4, pp. 2742-2749, Apr. 2016.
- [6] M. S. Diab, A. Massoud, S. Ahmed, and B. Williams, "A modular multilevel converter with ripple-power decoupling channels for three-phase MV adjustable-speed drives," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 34, no. 5, pp. 4048-4063, May 2019.
- [7] A. Marzoughi, R. Burgos, D. Boroyevich, and Y. Xue, "Design and comparison of cascaded h-bridge modular multilevel converter and 5-1 active neutral point clamped topologies for motor drive application," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 2, pp. 1404-1413, Mar./ Apr. 2018.
- [8] A. Antonopoulos, L. Angquist, S. Norrga, K. Ilves, L. Harnefors, and H. P. Nee, "Modular multilevel converter ac motor drives with constant torque from zero to nominal speed," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 3, pp. 1982-1993, May/Jun. 2014.
- [9] S. Debnath, J. Qin, and M. Saeedifard, "Control and stability analysis of modular multilevel converter under low-frequency operation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 9, pp. 5329-5339, Sept. 2015.
- [10] B. Li, et al., "An improved circulating current injection method for modular multilevel converters in variable-speed drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 11, pp. 7215-7225, Nov. 2016.
- [11] S. Sau and B. G. Fernandes, "Modular multilevel converter based variable speed drive with reduced capacitor ripple voltage," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 5, pp. 3412-3421, May 2019.
- [12] J. Kolb, F. Kammerer, M. Gomringer, and M. Braun, "Cascaded control system of the modular multilevel converter for feeding variable-speed drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 1, pp. 349-357, Jan. 2015.
- [13] B. Wu and M. Narimani, *High-Power Converters and AC Drives*, John Wiley & Sons, 2017.
- [14] S. Du, B. Wu, and N. R. Zargari, "Common-mode voltage elimination for variable-speed motor drive based on flying-capacitor modular multilevel converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 7, pp. 5621-5628, Jul. 2018.
- [15] S. Du, B. Wu, and N. Zargari, "Common-mode voltage minimization for grid-tied modular multilevel converter," *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 66, no. 10, pp. 7480-7487, Jul. 2018.
- [16] M. Huang, J. Zou, X. Ma, Y. Li, and M. Han, "Modified modular multilevel converter to reduce submodule capacitor voltage ripples

**احمد باقری ملاحسنعلی** در سال ۱۳۹۵ مدرک کارشناسی مهندسی برق را از دانشگاه یزد و در سال ۱۳۹۸ مدرک کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی برق- قدرت از دانشگاه تهران دریافت نمود. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از مبدل‌های توان بالا و کنترل محرکه‌های الکتریکی.

**حسین ایمان عینی** تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۸۲ در دانشگاه تهران به پایان رسانده است. ایشان مقطع دکترا را تحت برنامه دکترای مشترک میان دانشگاه تهران و دانشگاه پلی‌تکنیک گرونوبل فرانسه و زمینه تخصصی الکترونیک- قدرت در سال ۱۳۸۷ به پایان رسانده و هم‌اکنون دانشیار گروه مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از مبدل‌های چندسطحی، کاربرد مبدل‌های الکترونیک قدرت در سیستم‌های قدرت و سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر.