

ارزیابی تحلیلی و تجربی تلفات در مبدل‌های ماتریسی

ابراهیم بابائی
استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز

سید حسین حسینی
استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز

گئورگ قره‌پتیان
استاد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

در این مقاله، محاسبات کامل مربوط به انواع تلفات موجود در مبدل‌های ماتریسی شامل تلفات حالت هدایت و کلیدزنی ارائه می‌شود. معمولاً یک مدار اسنابر $R-C$ کوچک برای محدود کردن ولتاژ کلیدها در محدوده قابل قبول، در دو سر هر یک از کلیدهای دو طرفه قرار می‌گیرد. در این مقاله، تحلیل کامل تلفات مدار اسنابر نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که این آرایش ساده مدار اسنابر باعث افزایش تلفات مبدل می‌شود. به عبارت دیگر، تلفات مدار اسنابر در مقایسه با کل تلفات نیمه‌هادی‌ها، مقادیر بیش‌تری را به خود اختصاص می‌دهند. یکی دیگر از نتایج این تحقیق این است که تلفات مدار اسنابر در یک مبدل ماتریسی مستقل از فرکانس‌های ورودی و خروجی و هم چنین ضرایب توان‌های ورودی و خروجی بوده و مقدار آن به طور عمده بستگی به ولتاژ ورودی، خازن مدار اسنابر و فرکانس کلیدزنی دارد. در این مقاله، نشان داده شده است که سهم زیاد انرژی تلف شده در حالت هدایت، مستقل از الگوی کلیدزنی و ضریب توان بار می‌باشد. هم چنین اکثر تلفات کلیدزنی در زمان روشن شدن کلید، ناشی از خازن مدار اسنابر است. هم‌خوانی بسیار خوبی بین محاسبات ریاضی ارائه شده در این مقاله مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه وجود دارد.

کلمات کلیدی: مبدل ماتریسی، کلید دو طرفه، تلفات حالت هدایت، تلفات کلیدزنی، مدار اسنابر.

Analytical and Experimental Assessment of Losses in Matrix Converters

E. Babaei and Faculty of Electrical and Computer Engineering,
S. H. Hosseini University of Tabriz, Tabriz, Iran
G. B. Gharehpetian Electrical Engineering Department, Amirkabir
University of Technology, Tehran, IRAN

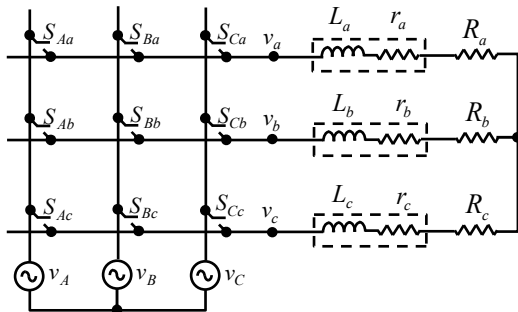
Abstract

This paper investigates the complete calculations of the different losses in matrix converters such as switching and conduction losses. A small R-C snubber circuit is usually connected across two terminals of a bidirectional switch to limit the device voltage at an appropriate level. Also, the complete analysis of the snubber circuit losses is given. The results show that this simple snubber arrangement causes the total converter losses to increase. In other words, it has been found that the snubber circuit results in a high power loss compared to the total semiconductor losses. Another result of this research is that the snubber losses in the matrix converter are independent of the input and output frequencies and the power factors. The snubber losses mainly depend on the input voltage, the snubber capacitance and the switching frequency. Also, in this paper it is shown that the total energy losses is independent of the switching pattern and the load power factor and the majority of the turn-on energy losses comes from the snubber capacitor. Very good correlation between the analysis and the measured results were obtained.

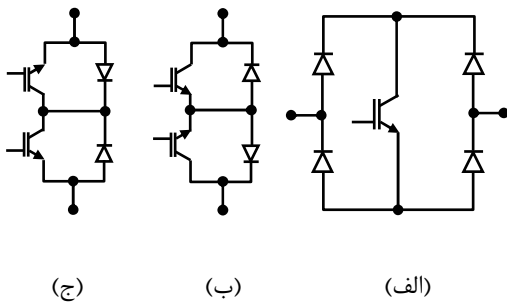
Key words: Matrix converter, Bidirectional switch, Conduction losses, Switching losses, Snubber circuit.

۱- مقدمه

عبوری از آن بوده و تلفات کلیدزنی متناسب با فرکانس کلیدزنی می‌باشد. مشخصه‌های قطعات نیمه‌هادی انتخاب شده برای کلیدهای دو طرفه مورد نیاز برای مبدل‌های ماتریسی عامل تعیین کننده در تلفات کلیدهای قدرت است. در این مقاله، روش تحلیلی جامعی برای محاسبه انواع تلفات در مبدل‌های ماتریسی ارائه می‌شود. هم چنین یک نمونه آزمایشگاهی مبدل ماتریسی سه فاز با ولتاژ ورودی 380V خط و جریان خروجی 7A برای بررسی کارایی روش‌های تحلیلی ارائه شده و انطباق آن‌ها با نتایج عملی، طراحی و ساخته شده است.



شکل ۱- مدار قدرت مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز



شکل ۲- نمونه‌هایی از کلیدهای دو طرفه

۲- محاسبات تلفات در مبدل ماتریسی

در این قسمت، تلفات نیمه‌هادی‌ها در مبدل ماتریسی مورد بررسی قرار می‌گیرد. تلفات نیمه‌هادی‌ها در مبدل ماتریسی، مجموع تلفات حالت هدایت (P_c) و تلفات کلیدزنی (P_s) می‌باشد. تلفات گیت و تلفات حالت خاموش ناشی از جریان‌های نشتی به دلیل این که کوچک می‌باشند صرف‌نظر می‌شوند. تلفات حالت هدایت در فرکانس‌های کلیدزنی پایین قابل توجه می‌باشد در

ساختار مبدل‌های ماتریسی نخستین بار توسط Gyugyi و Pelly در سال ۱۹۷۶ معرفی گردید. آن‌ها با استفاده از کلیدهای دو طرفه قابل کنترل، اصول سیکلوکانورترها را برای به دست آوردن ولتاژ خروجی با فرکانس نامحدود گسترش دادند. عیب عمده روش آن‌ها این بود که ولتاژ خروجی و جریان ورودی شامل هارمونیک‌های ناخواسته بزرگی بودند، که به آسانی توسط فیلترها حذف نمی‌شدند. این مشکل با ارایه یک روش مدولاسیون جدید با استفاده از تکنیک "مدولاسیون پهنای پالس (PWM)"، توسط Venturini و Alesina حل گردید [۱].

گسترش واقعی مبدل‌های ماتریسی با کارهای منتشر شده در سال ۱۹۸۰ آغاز می‌شود. آن‌ها مدار قدرت مبدل را به صورت یک ماتریسی از کلیدهای دو طرفه ارائه دادند و مبدل ماتریسی را معرفی کردند. کلیدهای استفاده شده دو طرفه چهار ربعی کاملاً کنترل شونده می‌باشند. کلیدهای دو طرفه بایستی بتوانند ولتاژها را با هر قطبیتی که باشند مسدود کنند و هم چنین بایستی قادر باشند جریان را در هر جهتی از خود عبور دهند. با چنین آرایشی از کلیدها، مبدل‌های ماتریسی قادر به انتقال انرژی دو طرفه خواهند شد. شکل (۱) مدار قدرت یک مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز را نشان می‌دهد [۲-۵]. در شکل (۲) نمونه‌هایی از کلیدهای دو طرفه قابل استفاده در مبدل‌های ماتریسی نشان داده شده است. با توجه به مزایایی که آرایش امیتر مشترک (شکل (۲-ب)) دارد [۶-۷] معمولاً در مبدل‌های ماتریسی از این ساختار استفاده می‌شود. در نمونه آزمایشگاهی این مقاله نیز از این ساختار استفاده شده است.

مبدل‌های ماتریسی مزایای زیادی نسبت به مبدل‌های کلاسیک ac/dc/ac دارند. از جمله این مزایا، می‌توان به حذف بانک‌های خازنی بزرگ، پاسخ سریع، و قابلیت طراحی به صورت یکپارچه اشاره کرد. عیب عمده مبدل‌های ماتریسی افزایش تعداد کلیدهای دو طرفه می‌باشد. با توجه به افزایش تعداد کلیدهای دو طرفه، بررسی تلفات در مبدل‌های ماتریسی امری مهم به شمار می‌رود. در مبدل‌های ماتریسی تلفات عمدتاً ناشی از تلفات کلیدها و مدارات اسنابر می‌باشد. تلفات کلیدها شامل تلفات هدایت و تلفات کلیدزنی است. تلفات حالت هدایت متناسب با افت ولتاژ حالت روشن در دو سر نیمه‌هادی و جریان

$$V_f = (V_T + R_T \cdot I^\beta) + (V_d + R_d \cdot I) \quad (2)$$

در معادلات فوق، V_T, V_d, R_T, R_d و β در دمای خاصی مقادیر ثابت بوده و می‌توان آن‌ها را از برگه‌های اطلاعاتی ارائه شده توسط سازنده قطعات به دست آورد.

توان لحظه‌ای تلف شده در هر کلید برابر است با:

$$p(t) = V_f(t) \cdot I(t) \quad (3)$$

$$p(t) = (V_d + V_T) \cdot I(t) + R_d I^2(t) + R_T I^{\beta+1}(t) \quad (4)$$

با در نظر گرفتن کلیدهای S_{Aa+}, S_{Ba+} و S_{Ca+} در شکل (۳)، انرژی تلف شده در این کلیدها در هر فاصله زمانی بین t_1 و t_2 به صورت زیر خواهد شد:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} [(V_d + V_T) \cdot (I_{Aa+} + I_{Ba+} + I_{Ca+}) + R_d (I_{Aa+}^2 + I_{Ba+}^2 + I_{Ca+}^2) + R_T (I_{Aa+}^{\beta+1} + I_{Ba+}^{\beta+1} + I_{Ca+}^{\beta+1})] dt \quad (5)$$

این کلیدها فقط برای فاصله زمانی نیم سیکل مثبت جریان خروجی هدایت می‌کنند و فقط یکی از این کلیدها در این فاصله زمانی هدایت می‌کند. بنابراین:

$$\left. \begin{aligned} I_{Aa+} + I_{Ba+} + I_{Ca+} &= I_{om} \sin \omega_o t \\ I_{Aa+}^2 + I_{Ba+}^2 + I_{Ca+}^2 &= I_{om}^2 \sin^2 \omega_o t \\ I_{Aa+}^{\beta+1} + I_{Ba+}^{\beta+1} + I_{Ca+}^{\beta+1} &= I_{om}^{\beta+1} \sin^{\beta+1} \omega_o t \end{aligned} \right\} \quad \text{for } 0 < t \leq \frac{\pi}{\omega_o} \quad (6)$$

$$I_{Aa+} = I_{Ba+} = I_{Ca+} = 0 \quad \text{for } \frac{\pi}{\omega_o} < t \leq \frac{2\pi}{\omega_o}$$

در رابطه فوق، I_{om} و ω_o به ترتیب مقادیر پیک و فرکانس زاویه‌ای جریان خروجی می‌باشند.

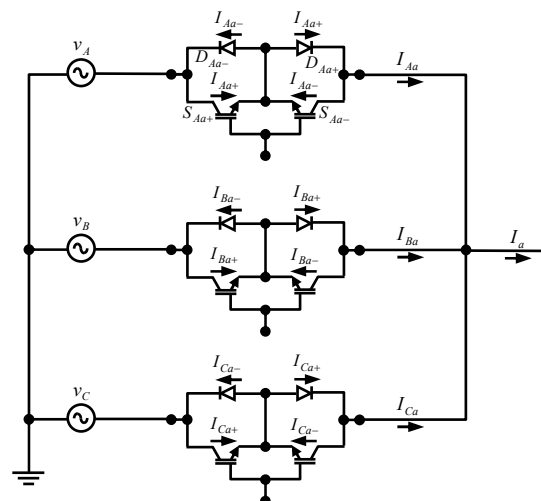
بنابراین کل انرژی تلف شده در این سه کلید در یک سیکل از جریان خروجی با جایگزینی معادله (۶) در معادله (۵) حاصل می‌شود.

حالی که تلفات کلیدزنی تحت عمل‌کرد در فرکانس‌های بالا نقش اساسی خواهد داشت. تلفات حالت هدایت ناشی از افت ولتاژ حالت روشن IGBTها و دیودها در زمان هدایت می‌باشد. به همین ترتیب تلفات کلیدزنی، ناشی از عمل‌کرد ناقص کلیدزنی می‌باشد [۸].

۲-۱- تلفات حالت هدایت

در این قسمت، محاسبات مربوط به تلفات حالت هدایت در مبدل‌های ماتریسی سه فاز به سه فاز ارائه می‌شود. آفت ولتاژ حالت مستقیم^۱ در دو سر IGBT و دیود، تابعی از جریان کلکتور و دمای اتصال^۲، T_j می‌باشد. یک فاز خروجی مبدل ماتریسی با جریان خروجی سینوسی برای محاسبه تلفات حالت هدایت مطابق شکل (۳) در نظر گرفته می‌شود. برای تعیین افت ولتاژ حالت روشن (V_f) هر کلید دو طرفه به صورت تابعی از جریان، می‌توان دیود را به صورت یک ولتاژ ثابت (V_d) سری شده با یک مقاومت (R_d) مدل کرد. مشخصه IGBT را می‌توان از اطلاعات داده شده توسط سازنده تعیین کرد. بنابراین افت ولتاژ دو سر هر کلید دو طرفه، مجموع افت ولتاژ در دو سر IGBT و دیود می‌باشد:

$$V_f = V_{f,IGBT} + V_{f,Diode} \quad (1)$$



شکل ۳- یک فاز خروجی (a فاز) مبدل ماتریسی

- 1- Forward Voltage Drop
- 2- Junction Temperature

$$P_S = f_s \cdot E_{Loss} \quad (11)$$

تلفات کلیدزنی فقط در زمان روشن و خاموش شدن کلیدها وجود خواهد داشت. در مبدل ماتریسی همیشه جریان از یک کلید در حال هدایت به مدار اسنابر R-C و یا برعکس منتقل می‌شود. اگر افت ولتاژ در خازن مدار اسنابر در طول زمان کلیدزنی، ثابت بماند در این صورت، قطعه در حالت کلیدزنی عمل کرد مقاومتی از خود نشان داده و در نتیجه تلفات کلیدزنی بسیار پایین خواهد شد.

۲-۲-۱- تلفات کلیدزنی در زمان خاموش شدن

برای محاسبه تلفات کلیدزنی در زمان خاموش شدن، کلید S_{Aa} در شکل (۳) در نظر گرفته می‌شود. درست قبل از خاموش شدن، این کلید جریان خروجی I_a را از خود عبور می‌داد. بعد از خاموشی، I_a توسط سه مدار اسنابر در فاز خروجی a جاری شده و افت ولتاژ در دو سر کلید S_{Aa} برابر $\frac{RI_a}{3}$ خواهد شد چرا که خازن مدار اسنابر در شرایط اولیه دشارژ شده بود. فرض می‌شود که جریان و ولتاژ قطعات در زمان خاموش شدن مطابق شکل (۴) به صورت خطی تغییر می‌کنند [۹]. در این صورت انرژی تلف شده در حالت خاموش شدن کلید به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S_{Aa, Turn-off loss} = \frac{I_a^2 \cdot R \cdot t_{off}}{18} \quad (12)$$

در معادله فوق، R مقاومت مدار اسنابر و t_{off} زمان خاموشی قطعه می‌باشد.

با فرض این که جریان خروجی در فاصله زمانی هر کلیدزنی خاص ثابت می‌ماند کل انرژی تلف شده برای کلیدهای فاز خروجی a سه برابر مقدار حساب شده در معادله (۱۲) خواهد شد. کل انرژی تلف شده در مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز در هر سیکل در حالت خاموش شدن به صورت زیر خواهد شد:

$$Total\ turn-off\ loss = \frac{R \cdot t_{off}}{6} (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) \quad (13)$$

$$E = \int_0^{\pi/\omega_o} [(V_d + V_T) \cdot I_{om} \sin \omega_o t + R_d I_{om}^2 \sin^2 \omega_o t + R_T I_{om}^{\beta+1} \sin^{\beta+1} \omega_o t] dt \quad (7)$$

از معادله فوق مشخص است که کل انرژی تلف شده در حالت هدایت، مستقل از الگوی کلیدزنی و ضریب توان بار می‌باشد. متوسط توان تلف شده در این سه کلید به صورت زیر خواهد شد:

$$P_C' = \frac{E}{2\pi/\omega_o} \quad (8)$$

$$P_C' = \frac{I_{om}}{\pi} (V_d + V_T) + \frac{I_{om}^2}{4} R_d + \frac{I_{om}^{\beta+1} R_T}{2\pi/\omega_o} \int_0^{\pi/\omega_o} \sin^{\beta+1} \omega_o t dt \quad (9)$$

انتگرال موجود در معادله (۹) برای مقادیر خاص β فقط از طریق روش‌های عددی قابل حل است. ثابت‌های موجود در معادله (۹) را می‌توان از روی برگه‌های اطلاعاتی داده شده توسط سازنده قطعات به دست آورد.

کل تلفات حالت هدایت در مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز (P_C) ، ۶ برابر تلفات محاسبه شده در معادله (۹) می‌باشد چرا که برای کلیدهایی که نیم سیکل‌های منفی جریان را از خود عبور می‌دهند به همان اندازه تلفات به وجود می‌آید و ضمناً مبدل ماتریسی بحث شده از نوع سه فاز به سه فاز می‌باشد. به عبارت دیگر:

$$P_C = 6 \times \left[\frac{I_{om}}{\pi} (V_d + V_T) + \frac{I_{om}^2}{4} R_d + \frac{I_{om}^{\beta+1} R_T}{2\pi/\omega_o} \int_0^{\pi/\omega_o} \sin^{\beta+1} (\omega_o t) dt \right] \quad (10)$$

۲-۲- تلفات کلیدزنی

تلفات کل کلیدزنی یک کلید مبدل ماتریسی از حاصل ضرب فرکانس کلیدزنی (f_s) ، و انرژی کلیدزنی تلف شده در هر پالس (E_{Loss}) به دست می‌آید. به عبارت دیگر:

که شکل موج‌های جریان و ولتاژ کلید در زمان روشن شدن مطابق شکل (۵) به صورت خطی تغییر می‌کند [۹]. در این صورت انرژی تلف شده در حالت روشن شدن کلید به صورت زیر خواهد شد:

$$S_{Aa} \text{ turn-on loss} = \left(I_a + \frac{3(V_{AC} + \Delta V_C)}{R} \right) \times \left((V_{AC} + \Delta V_C) + \frac{R \cdot I_a}{3} \right) \times \frac{t_{on}}{6} \quad (16)$$

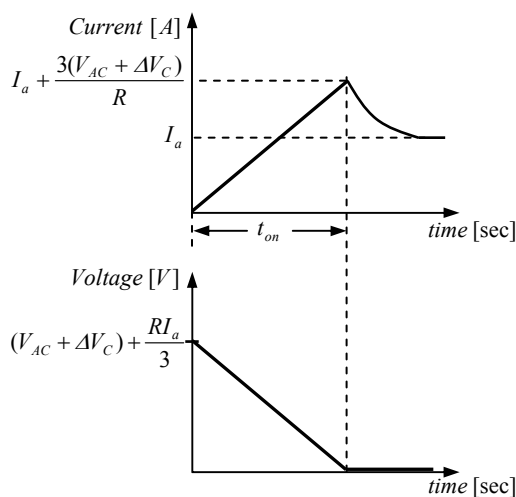
در معادله فوق، t_{on} زمان صعود جریان می‌باشد.

تلفات برای دو کلید دیگر در همان فاز خروجی (S_{Ca} و S_{Ba}) به ترتیب با جایگزینی V_{AC} با V_{BA} و V_{CB} در معادله (۱۶) به دست می‌آید. نتایج زیر در این حالت برقرار است:

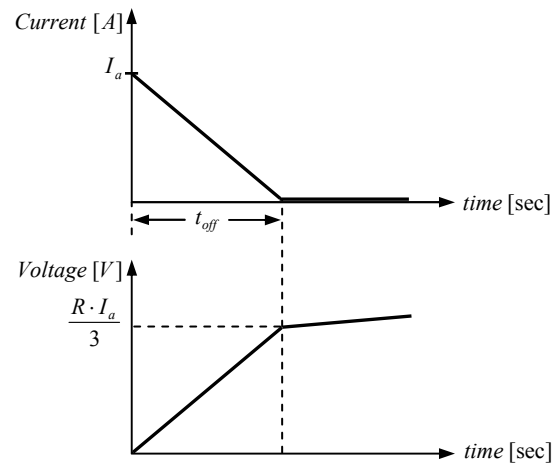
$$V_{AC} + V_{BA} + V_{CB} = 0 \quad (17)$$

$$V_{AC}^2 + V_{BA}^2 + V_{CB}^2 = 3V_L^2 \quad (18)$$

$$\Delta V_C = \frac{I_a \cdot \tau}{3C} \quad (19)$$



شکل ۵- شکل موج‌های جریان و ولتاژ کلید در زمان روشن شدن



شکل ۴- شکل موج‌های جریان و ولتاژ کلید در زمان خاموش شدن

اگر فرض شود که جریان‌های خروجی سینوسی و سیستم سه فاز متعادل باشند در این صورت:

$$I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 = 3I_o^2 \quad (14)$$

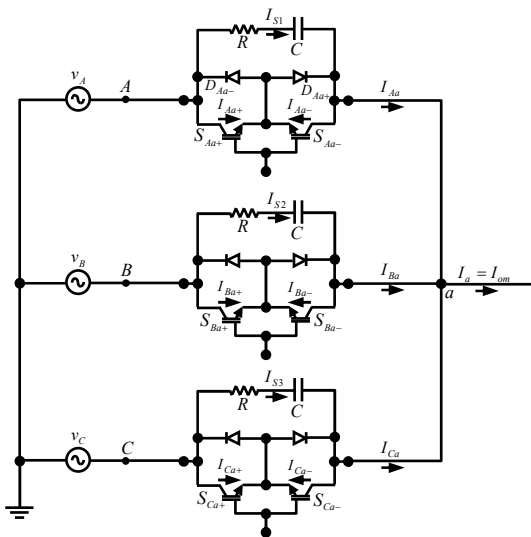
در رابطه فوق، I_o مقدار موثر جریان خروجی می‌باشد. در نتیجه، کل تلفات حالت خاموش شدن مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز در هر سیکل کلیدزنی ثابت بوده و با معادله زیر ارائه خواهد شد:

$$\text{Total turn-off loss} = \frac{R \cdot t_{off} \cdot I_o^2}{2} \quad (15)$$

۲-۲-۲- تلفات کلیدزنی در زمان روشن شدن

برای محاسبه تلفات زمان روشن شدن، باز کلید S_{Aa} را در نظر بگیرید. درست قبل از روشن شدن این کلید، جریان خروجی I_a در سه مدار اسنابر موازی جاری بوده و خازن مدار اسنابر مربوط به کلید S_{Aa} به مقدار $(V_{AC} + \Delta V_C)$ شارژ شده بود. ولتاژ دو سر کلید برابر مجموع $(V_{AC} + \Delta V_C)$ و افت ولتاژ دو سر مقاومت مدار اسنابر $\left(\frac{RI_a}{3}\right)$ خواهد شد. در پایان زمان روشن شدن، جریان کلید مجموع جریان بار (I_a) و پیک جریان دشارژ اسنابر $\left(\frac{3(V_{AC} + \Delta V_C)}{R}\right)$ خواهد شد. باز فرض می‌شود

تلفات زمانی که یکی از کلیدها روشن می‌شوند به وجود می‌آید. تلفات اضافی دیگر در فاصله تاخیر زمانی که همه کلیدها خاموش هستند به وجود می‌آید. یک فاز خروجی مبدل ماتریسی مطابق شکل (۶) برای محاسبه تلفات مدار اسنابر در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۶- مدار اسنابر با کلیدهای دو طرفه

فرض می‌شود که ولتاژهای ورودی و جریان خروجی در هر مرحله کلیدزنی ثابت بوده و تمامی عملیات کلیدزنی در مبدل ماتریسی ایده‌آل می‌باشند. هم چنین فرض می‌شود که کلید S_{Aa} برای مدت زمانی روشن بوده و در لحظه $t = 0$ باز می‌شود. این لحظه در شکل (۷-الف) نشان داده شده است. در این شرایط تمامی کلیدها برای مدت زمان تاخیر τ ، به صورت باز باقی می‌مانند. در مدت زمان تاخیر، انرژی تلف شده در هر مقاومت برابر است با:

$$E_R = \left(\frac{I_a}{3}\right)^2 \cdot R \cdot \tau \quad (22)$$

کل تلفات انرژی $E_{R\tau}$ ، در مدت زمان برقراری این شرایط برابر با مجموع انرژی‌های تلف شده در مقاومت‌ها خواهد شد. بنابراین:

$$E_{R\tau} = E_{R1} + E_{R2} + E_{R3} \quad (23)$$

که در معادلات فوق، V_L ولتاژ خط، τ تاخیر زمانی بین سیگنال‌های فرمان‌های کلیدها، و C خازن مدار اسنابر است. با جایگزینی معادلات فوق در معادله (۱۶) و ساده‌سازی آن، کل تلفات در زمان روشن شدن برای فاز خروجی a به صورت زیر خواهد شد:

$$\text{Phase } a \text{ turn-on loss} = t_{on} \times \left[\frac{3V_L^2}{2R} + I_a^2 \left(\frac{\tau^2}{6R \cdot C^2} + \frac{R}{6} + \frac{\tau}{3C} \right) \right] \quad (20)$$

برای محاسبه کل تلفات در زمان روشن شدن مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز، با جایگزینی I_a با I_b و I_c به ترتیب تلفات در زمان روشن شدن برای فازهای خروجی b و c به دست می‌آیند. حال با استفاده از معادله (۱۴)، کل تلفات در زمان روشن شدن مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز در یک مرحله کلیدزنی به صورت زیر در می‌آید:

$$\text{Total turn-on loss} = t_{on} \times \left[\frac{9V_L^2}{2R} + I_o^2 \left(\frac{\tau^2}{2R \cdot C^2} + \frac{R}{2} + \frac{\tau}{C} \right) \right] \quad (21)$$

لازم به توضیح است که اکثر تلفات در زمان روشن شدن ناشی از خازن مدار اسنابر است.

۲-۳- تلفات مدار اسنابر

عملکرد سالم IGBTها در عمل کلیدزنی، نیاز به استفاده از مدارات اسنابر در بسیاری از کاربردها مانند اینورترهای منبع ولتاژ را از بین می‌برد. اما در مبدل‌های ماتریسی به دلیل عدم وجود مسیرهای هرزگرد، نیاز به استفاده از مدارات اسنابر وجود دارد. به عبارت دیگر، مدار اسنابر برای محدود کردن dv/dt در دو سر کلیدهای دو طرفه نیاز خواهد بود. در مبدل ماتریسی آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده در این تحقیق، از یک R-C کوچک به عنوان یک مدار اسنابر برای زمان خاموش شدن در دو سر هر یک از کلیدهای دو طرفه برای محدود کردن ولتاژ دو سر کلیدها در سطح قابل قبول استفاده شده است. مدار اسنابر استفاده شده در مبدل ماتریسی باعث اتلاف توان می‌شود. این

در زمانی که کلید S_{Ba} روشن می‌شود، شکل موج‌های جریان در مقاومت‌های R_1 , R_2 و R_3 مشابه هستند. بنابراین مقادیر یکسان انرژی در مقاومت‌های R_1 و R_3 تلف خواهد شد. در نتیجه، کل انرژی تلف شده در مقاومت‌ها در مدت زمان این شرایط، سه برابر انرژی تلف شده در مقاومت R_2 خواهد بود:

$$E_{R\tau} = \frac{3}{2} C \cdot (V_{Ba} + \Delta V_C)^2 \quad (27)$$

با ادامه تحلیل فوق برای یک دنباله کلیدزنی، مشاهده می‌شود که کل انرژی تلف شده E_τ ، در مقاومت‌ها در طول سه تاخیر زمانی در یک دنباله کلیدزنی برابر مجموع انرژی‌های تلف شده در هر تاخیر زمانی است:

$$E_\tau = 3E_{R\tau} = I_a^2 \cdot R \cdot \tau \quad (28)$$

کل انرژی تلف شده در مقاومت‌ها، زمانی که هر یک از کلیدهای S_{Aa} , S_{Ba} و S_{Ca} در یک دنباله کلیدزنی روشن می‌شوند، برابر است با:

$$E_{on} = \frac{3}{2} C \cdot [(V_{AC} + \Delta V_C)^2 + (V_{BA} + \Delta V_C)^2 + (V_{CB} + \Delta V_C)^2] \quad (29)$$

یا

$$E_{on} = \frac{3}{2} C \cdot [V_{AC}^2 + V_{BA}^2 + V_{CB}^2 + 3\Delta V_C^2 + 2\Delta V_C(V_{AC} + V_{BA} + V_{CB})] \quad (30)$$

با جایگزینی معادلات (۱۷) و (۱۸) در معادله (۳۰)، می‌توان نتیجه گرفت:

$$E_{on} = \frac{3}{2} C \cdot (3V_L^2 + 3\Delta V_C^2) \quad (31)$$

یا

$$E_{on} = \frac{9C \cdot V_L^2}{2} + \frac{9C \cdot \Delta V_C^2}{2} \quad (32)$$

با جایگزینی معادله (۲۵) در معادله (۳۲) می‌توان نوشت:

$$E_{R\tau} = \frac{I_a^2 \cdot R \cdot \tau}{3} \quad (24)$$

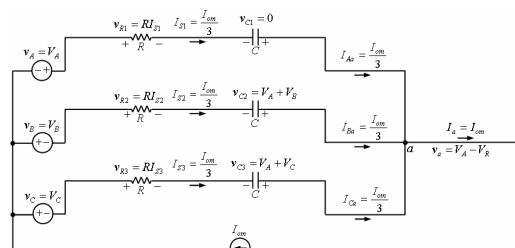
در فاصله تاخیر زمانی، خازن به اندازه ΔV_C به صورت معادله زیر شارژ می‌شود:

$$\Delta V_C = \frac{I_a \cdot \tau}{3C} \quad (25)$$

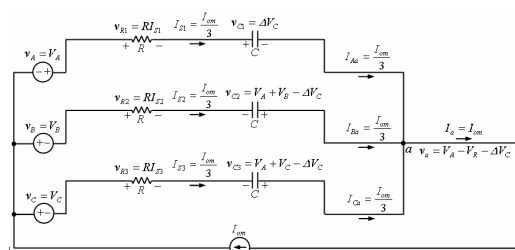
شرایط درست قبل از روشن شدن کلید S_{Ba} در شکل (۷-ب) نشان داده شده است. زمانی که کلید S_{Ba} روشن شده است (شکل (۷-پ)) فرض می‌شود که خازن C_2 کاملاً شارژ می‌شود. بنابراین تمام انرژی ذخیره شده در خازن C_2 در مقاومت R_2 تلف می‌شود.

در نتیجه انرژی تلف شده در مقاومت R_2 برابر است با:

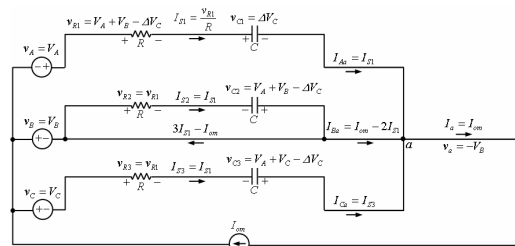
$$E_{R2} = \frac{1}{2} C \cdot (V_{Ba} + \Delta V_C)^2 \quad (26)$$



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۷- مدارات معادل برای تحلیل مدار اسنابر

و خروجی و هم چنین ضرایب توان‌های ورودی و خروجی می‌باشد. تلفات مدار اسنابر به صورت عمده بستگی به ولتاژ ورودی، خازن مدار اسنابر و فرکانس کلیدزنی دارد.

۳- روش مدولاسیون اعمالی

از آن جایی که مبدل‌های ماتریسی به وسیله منابع ولتاژ تغذیه می‌شوند و از طرفی اکثر بارهای مصرفی دارای خاصیت سلفی هستند برای عمل‌کرد سالم مبدل‌های ماتریسی باید دو قانون زیر رعایت شوند:

- برای جلوگیری از اتصال کوتاه در سمت منابع ولتاژ، نبایستی دو خط ولتاژ ورودی به یک خط خروجی مشابه وصل شوند (بروز اضافه جریان)،

- برای جلوگیری از مدار باز شدن بار، نبایستی خطوط خروجی باز شوند (بروز اضافه ولتاژ).

مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز در شکل (۱) نشان داده شده است. این مبدل شامل ۹ کلید دو طرفه می‌باشد. ولتاژهای ورودی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$[V_I(t)] = \begin{bmatrix} v_A(t) \\ v_B(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} = V_{im} \begin{bmatrix} \cos(\omega_1 t) \\ \cos(\omega_1 t - 120^\circ) \\ \cos(\omega_1 t + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (40)$$

در روابط فوق V_{im} مقدار پیک و ω_1 فرکانس زاویه‌ای ولتاژهای ورودی را نشان می‌دهد.

اگر ولتاژهای خروجی در مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز متعادل در نظر گرفته شوند، در این صورت کلیدها در مبدل بایستی طوری کنترل شوند که ولتاژهای خروجی دارای مولفه‌های اصلی به صورت زیر باشند:

$$[V_O(t)] = \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} = V_{om} \begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t) \\ \cos(\omega_0 t - 120^\circ) \\ \cos(\omega_0 t + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (41)$$

که در روابط فوق، V_{om} مقدار پیک و ω_0 فرکانس زاویه‌ای ولتاژهای خروجی را نشان می‌دهد.

در این مقاله، از الگوریتم مدولاسیون جدیدی به شیوه PWM که در مرجع [۸] برای مبدل‌های ماتریسی ارائه شده است برای تست مبدل طراحی شده استفاده خواهد شد. توابع کلیدزنی در

$$E_{on} = \frac{9C \cdot V_L^2}{2} + \frac{I_a^2 \cdot \tau^2}{2C} \quad (33)$$

بنابراین کل انرژی تلف شده در قسمتی از مبدل ماتریسی در یک دنباله کلیدزنی که خروجی فاز a را تغذیه می‌کند برابر است با:

$$E = E_\tau + E_{on} \quad (34)$$

یا

$$E = I_a^2 \cdot R \cdot \tau + \frac{9C \cdot V_L^2}{2} + \frac{I_a^2 \cdot \tau^2}{2C} \quad (35)$$

یا

$$E = I_a^2 \cdot \left(R \cdot \tau + \frac{\tau^2}{2C} \right) + \frac{9C \cdot V_L^2}{2} \quad (36)$$

کل تلفات مدار اسنابر، در یک دنباله کلیدزنی می‌تواند با در نظر گرفتن دو فاز خروجی دیگر به دست می‌آید. به عبارت دیگر:

$$E = (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) \cdot \left(R \cdot \tau + \frac{\tau^2}{2C} \right) + 3 \frac{9C \cdot V_L^2}{2} \quad (37)$$

با در نظر گرفتن معادله (۱۴)، کل تلفات مدار اسنابر در یک دنباله کلیدزنی به صورت زیر در می‌آید:

$$E = 3I_o^2 \cdot \left(R \cdot \tau + \frac{\tau^2}{2C} \right) + \frac{27C \cdot V_L^2}{2} \quad (38)$$

بنابراین کل توان تلف شده در مدار اسنابر با فرکانس کلیدزنی f_s به صورت زیر خواهد شد:

$$P_{Snubber} = f_s \left[3I_o^2 \left(R \cdot \tau + \frac{\tau^2}{2C} \right) + \frac{27C \cdot V_L^2}{2} \right] \quad (39)$$

از معادله فوق نتیجه می‌شود که تلفات مدار اسنابر در یک مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز مستقل از فرکانس‌های ورودی

به ترتیب 10Ω و $0.01\mu F$ در نظر گرفته شده است. تاخیر زمانی مدار راه‌انداز در حدود $1\mu S$ می‌باشد.

در این قسمت از مقاله، نتایج عملی و هم چنین نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار PSCAD برای مبدل‌های ماتریسی بحث شده ارائه می‌شود. مبدل ماتریسی مورد آزمایش، مطابق شکل (۱) می‌باشد. بارهای استفاده شده در این مبدل از نوع بارهای اهمی-سلفی می‌باشند. پارامترهای این مبدل در جدول (۱) خلاصه شده است. شکل (۹) نتایج شبیه‌سازی و عملی را برای این مبدل نشان می‌دهد.

توان‌های اکتیو ورودی و خروجی اندازه‌گیری شده به ترتیب برابر $99W$ و $82.6W$ می‌باشند. در نتیجه تلفات اندازه‌گیری شده برابر $16.4W$ خواهد بود.

با استفاده از برگه‌های اطلاعاتی ارائه شده توسط سازنده IGBTها، مشخصات IGBTهای استفاده شده در ساخت کلیدهای قدرت در مدل آزمایشگاهی به صورت زیر می‌باشند:

$$V_T = 1.2V$$

$$R_T = 0.16\Omega$$

$$\beta = 1.04$$

$$V_d = 1.47V$$

$$R_d = 0.026\Omega$$

تلفات حالت هدایت با استفاده از رابطه (۱۰) به صورت زیر خواهد بود:

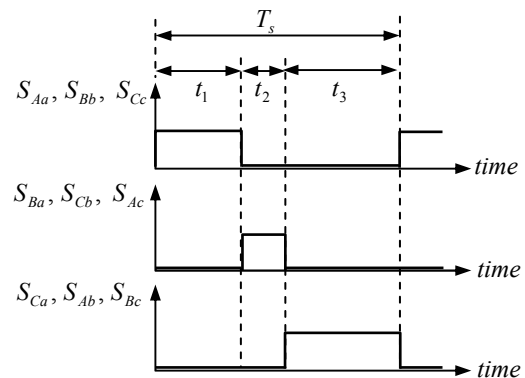
$$P_C = 6 \times \left[\frac{1.1}{\pi} (1.47 + 1.2) + \frac{1.1^2}{4} \times 0.026 + \frac{1.1^2 \times 0.16}{2\pi / 200\pi} \int_0^{\pi/200\pi} \sin^2(200\pi t) dt \right]$$

$$= 5.94W$$

(۴۳)

لازم به توضیح است که در رابطه (۱۰) مقدار $\beta + 1$ برابر ۲ منظور شده است چرا که β خیلی نزدیک به ۱ می‌باشد. تلفات کلیدزنی در زمان خاموش شدن با استفاده از رابطه (۱۵) و با در نظر گرفتن فرکانس کلیدزنی به صورت زیر خواهد بود:

چنین مبدلی، این اطمینان را خواهد داد که از بروز اتصال کوتاه در منابع ولتاژ (سمت ورودی) و مدار باز در منابع جریان (سمت خروجی) جلوگیری خواهد کرد، بنابراین در ترمینال‌های خروجی جریان‌های پیوسته‌ای تولید خواهد شد. در این استراتژی فرمان‌های کلیدها مطابق شکل (۸) تعیین خواهند شد.



شکل ۸- فرمان کلیدها برای مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز

دوره‌های زمانی t_1 , t_2 , t_3 برای این مبدل به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$t_n = T_s \left\{ \frac{1}{3} + \frac{2}{3} \frac{V_{om}}{V_{im}} \cos \left[(\omega_i - \omega_o)t - (n-1) \frac{2\pi}{3} \right] \right\}$$

for $n = 1, 2, 3$

(۴۲)

که در آن، T_s دوره زمانی نمونه‌برداری بوده و برابر $\frac{1}{f_s}$ می‌باشد (f_s فرکانس نمونه‌برداری است).

۴- نتایج عملی و شبیه‌سازی

IGBTهای استفاده شده در ساخت کلیدهای قدرت در مدل آزمایشگاهی ساخته شده در این تحقیق، از نوع BUP306D با دیود موازی- معکوس داخلی با ولتاژ و جریان $120V$ و $23A$ در دمای $25^\circ C$ می‌باشند. برای تولید سیگنال‌های فرمان گیت‌ها از میکروکنترلر 89C52 ساخت شرکت ATMEL مطابق الگوریتم کلیدزنی استفاده شده است. مقدار مقاومت و خازن مدار اسنابر

توجه شود که تلفات کلیدزنی در زمان خاموش شدن قابل صرف نظر می باشد.

به همین ترتیب تلفات کلیدزنی در زمان روشن شدن با استفاده از رابطه (۳۱) به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$P_{on} = (50 \times 10^{-9}) \times 2000 \times \left[\frac{9 \times 190.52^2}{2 \times 10} + 1.1^2 \times \left(\frac{(1 \times 10^{-6})^2}{2 \times 10 \times (0.01 \times 10^{-6})^2} + \frac{10}{2} + \frac{1 \times 10^{-6}}{0.01 \times 10^{-6}} \right) \right] \quad (45)$$

$$= 1.7W$$

با استفاده از رابطه (۳۹) تلفات مدار اسنابر به صورت زیر می باشد:

$$P_{Snubber} = 2000 \times \left[3 \times 1.1^2 \times \left(10 \times (1 \times 10^{-6}) + \frac{(1 \times 10^{-6})^2}{2 \times 0.01 \times 10^{-6}} \right) + \frac{27 \times 0.01 \times 10^{-6} \times 190.52^2}{2} \right] \quad (46)$$

$$= 10.236W$$

تلفات مدار اسنابر را می توان به طور تقریبی با اندازه گیری توان ورودی مبدل در حالت بی باری به دست آورد. توان ورودی بی باری اندازه گیری شده برابر 13W می باشد که هم خوانی خوبی با مقدار محاسبه شده دارد.

کل تلفات مبدل، مجموع تلفات حالت هدایت، تلفات اسنابر و تلفات کلیدزنی می باشد. از آن جایی که تلفات کلیدزنی در زمان خاموش شدن قابل صرف نظر می باشد و هم چنین تلفات اسنابر شامل تلفات کلیدزنی در زمان روشن شدن نیز می باشد بنابراین کل تلفات مبدل به صورت زیر خواهد بود:

$$P_{Loss} = 5.94 + 10.236 \quad (47)$$

$$= 16.176W$$

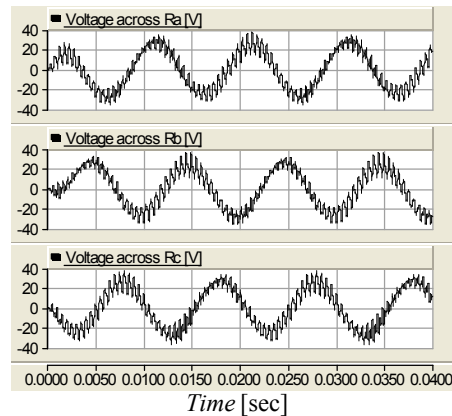
هم چنان که مشاهده می شود تلفات محاسبه شده هم خوانی خوبی با تلفات اندازه گیری شده دارد.

$$P_{off} = \frac{10 \times 200 \times 10^{-9} \times 1.1^2}{2} \times 2000 \quad (44)$$

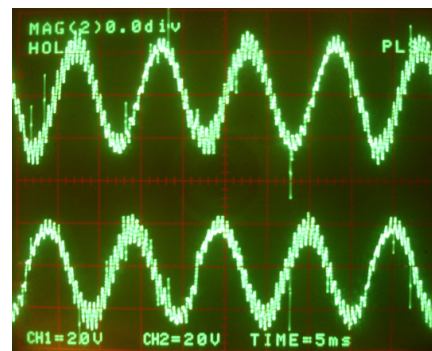
$$= 2.42 \times 10^{-3}W$$

جدول ۱- پارامترهای مبدل سه فاز به سه فاز

مقدار	کمیت
$110\sqrt{2}V$	V_{im}
$0.4V_{im}$	V_{om}
50Hz	f_i
100Hz	f_o
2kHz	f_s
55mH	$L_a = L_b = L_c$
8Ω	$r_a = r_b = r_c$
32Ω	$R_a = R_b = R_c$



(الف) نتایج شبیه سازی



(ب) نتایج عملی (خروجی دو فاز)

شکل ۹- جریان خروجی مبدل سه فاز به سه فاز (ولتاژ دو سر مقاومت 32Ω)

- [3] S. H. Hosseini, E. Babaei, "A New Generalized Direct Matrix Converter," 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings (ISIE 2001), Korea, Vol. 2, pp 1071-1076, 2001.
- [4] E. Babaei, S. H. Hosseini, "A New Circuit for Three-Phase to Three-Phase AC/AC Matrix Converters," International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO2003), Turkey, ELECTRIC-CONTROL, pp. 172-176, 2003.
- [5] D. Casadei, G. Serra, A. Tani, L. Zarri, "A Review on Matrix Converters," PELINCEC 2005, Warsaw, pp. 126-137, 2005.
- [6] C. Klumpner, P. Nielsen, I. Boldea, F. Baabjerg, "New Steps towards a Low-Cost Power Electronic Building Block for Matrix Converters," Proceedings of IAS 2000, Vol. 3, pp. 1964-1971, 2000.
- [7] L. Empringham, P. W. Wheeler, J. C. Clare, "Matrix Converter Bi-directional Switch Commutation Using Intelligent Gate Drives," Power Electronics and Variable Speed Drives, IEE 1998, No. 456, pp 626-631, 1998.

[۸] ابراهیم بابائی مدلسازی و طراحی روش‌های کنترلی نوین

مبدل‌های ماتریسی رساله دکتری، دانشگاه تبریز، بهار

۱۳۸۶.

- [9] S. Sunter, H. Altun, "A Method for Calculating Semiconductor Losses in the Matrix Converter," MELECON 98, Vol. 2, pp. 1260-1264, 1998.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تحلیل بسیار جامع از انواع تلفات موجود در مبدل‌های ماتریسی شامل تلفات حالت هدایت، تلفات کلیدزنی و تلفات مدار اسنابر به عمل آمد و معادلات ریاضی آن‌ها برای یک مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز به صورت کامل استخراج و اثبات شد. ارتباط انواع تلفات در مبدل‌های ماتریسی با انواع کمیت‌های مبدل، مانند فرکانس‌های ورودی و خروجی و هم چنین ضریب توان‌های ورودی و خروجی استخراج شد. یک مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز مجهز به مدار اسنابر R-C در رنج آزمایشگاهی با ولتاژ ورودی 380V خط و جریان خروجی 7A برای تست نتایج تئوری ارائه شده در این تحقیق، طراحی و ساخته شد. هم چنان که نتایج عملی و محاسباتی نشان دادند بیش‌ترین تلفات در مبدل ماتریسی ناشی از تلفات در مدار اسنابر می‌باشد. هم‌خوانی بسیار خوبی بین محاسبات ریاضی ارائه شده در این مقاله و مقادیر اندازه‌گیری شده وجود دارد.

مراجع

- [1] A. Alesina, M. G. B. Venturini, "Analysis and Design of Optimum-Amplitude Nine-Switch Direct AC-AC Converters," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 4 No. 1, pp. 101-112, January 1989.
- [2] S. Sunter, "A Vector Controlled Matrix Converter Induction Motor Drive," Ph.D. Thesis, University of Nottingham, July 1995.