

اینورتر جدید چندسطحی سه فاز هیبریدی بهبودیافته

سعید سعیدآبادی^۱، کارشناس ارشد؛ امین اشرف گندمی^۲، کارشناس ارشد؛ سیدحسین حسینی^۳، استاد؛ مهران صباحی^۴، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - saeidsaeidabadi@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - aashraf@gmail.com

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - hosseini@tabrizu.ac.ir

۴- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - sabahi@tabrizu.ac.ir

چکیده: در این مقاله یک اینورتر چندسطحی سه فاز هیبریدی جدید ارائه شده است. اینورتر چندسطحی پیشنهادی در مقایسه با ساختارهای مشابه از تعداد IGBT و مدار راه انداز کمتری تشکیل شده است. همچنین به دلیل پایین بودن تعداد منابع DC ورودی و نبود خازن الکترولیت در ساختار اینورتر پیشنهادی، کنترل این اینورتر برای تولید ولتاژ مطلوب ساده می‌باشد. این اینورتر از سه اینورتر تمام پل تک فاز، یک اینورتر تمام پل سه فاز و سلول‌های کمکی برای افزایش تعداد سطوح ولتاژ خطبه خط تشکیل شده است. در این مقاله اینورتر پیشنهادی از لحاظ تعداد ادوات سازنده، منابع DC ورودی و تنش ولتاژ با اینورترهای سه فاز موجود مقایسه شده است. همچنین برای ساختار اینورتر پیشنهادی محاسبات مربوط به تلفات نیز انجام گرفته و با اینورترهای مرسوم از دیدگاه تلفات نیز مقایسه شده است. در نهایت نتایج حاصل از شبیه‌سازی در محیط نرم افزار PSCAD/EMTDC و نتایج عملی حاصل از نمونه آزمایشگاهی برای تأیید عملکرد اینورتر پیشنهادی آورده شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: اینورتر سه فاز، اینورتر چندسطحی سه فاز هیبریدی، تلفات.

A New Improved Three Phase Hybrid Multilevel Inverter

S. Saeidabadi¹, MSc; A. Ashraf Gandomi², MSc; S. H. Hosseini³, Professor; M. Sabahi⁴, Associate Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: saeidsaeidabadi@gmail.com

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: aashraf@gmail.com

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: hosseini@tabrizu.ac.ir

4- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: sabahi@tabrizu.ac.ir

Abstract: In this paper, a new structure of a three-phase hybrid multilevel inverter is proposed. Proposed three-phase multilevel inverter is comprised of less number of IGBTs and gate drivers. Also, due to the fact that the number of DC sources is low and there aren't electrolytes capacitors, the control strategy for generating desirable voltage is simple. Proposed inverter is comprised of three single phase H-Bridge inverters, one three phase H-Bridge inverter and auxiliary cells for increasing number of output voltage levels. This inverter is compared from the point of views of number of components, number of DC sources and blocking voltage with common inverters. Also, the calculation of loss for proposed inverter is done and it is compared from the point of view of loss with other three-phase inverters. Finally, the results of simulation that is done in PSCAD/EMTDC software package and experimental results are presented to validate the performance of the inverter.

Keywords: Three-phase inverter, three-phase hybrid multilevel inverter, loss.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۲۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۱۱ و ۱۳۹۵/۰۵/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۲۷

نام نویسنده مسئول: مهران صباحی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - بلوار بهمن - دانشگاه تبریز - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

تولید ولتاژ سه فاز پنج سطحی در هر شاخه به سه منبع DC جدا از هم، نه خازن و سی و شش کلید قدرت نیاز دارد. از معایب این اینورتر می توان به تعداد بالای کلید قدرت و پیچیدگی روش کنترلی برای کنترل ولتاژ خازن ها اشاره کرد. در [۱۴] اینورتری بر اساس اینورتر با پل H ارائه شده است. در ساختار این اینورتر سه فاز چندسطحی خازن الکترولیت و سلف وجود دارد. همچنین برای تولید ولتاژ چندسطحی به تعداد بالای کلید قدرت نیاز دارد. در [۱۵] ساختار جدیدی برای اینورتر سه فاز چندسطحی ارائه شده است. این ساختار در مقایسه با اینورتر NPC نیازمند دیود کمتری می باشد؛ اما این ساختار به دو منبع DC اضافی و همچنین به تعداد زیاد خازن الکترولیت نیازمند است که باعث افزایش قیمت و اندازه اینورتر می شود. در [۱۶، ۱۷] یک سلول پایه متفاوت با استفاده از دو خازن، پنج کلید و دو دیود ارائه شده است. این سلول پایه ولتاژ سه سطحی تولید می کند و در مقایسه با اینورتر تمام پل و نیم پل دارای عناصر الکترونیک قدرت بیشتری می باشد.

در سال های اخیر برای کاهش هر چه بیشتر عناصر سازنده و منابع ایزوله DC، اینورترهای سه فاز چندسطحی از ساختارهای هیبریدی (ترکیبی) استفاده می شود. در [۲۰-۱۸] اینورترهای سه فاز هیبریدی ارائه شده است. طبقه اصلی اینورتر ارائه شده دارای ولتاژ بزرگ و طبقه های کمکی دارای ولتاژ پایین می باشند. طبقه اصلی عمدتاً از اینورترهای NPC سه سطحی یا اینورترهای تمام پل سه فاز تشکیل شده است. این ساختارها برای تولید ولتاژ سه فاز چندسطحی دارای تعداد کم عناصر الکترونیک قدرت و همچنین دارای تعداد کم منابع DC ایزوله در مقایسه با اکثر ساختارها می باشند.

در این مقاله اینورتر سه فاز چندسطحی هیبریدی جدید پیشنهاد می شود. در این ساختار خازن الکترولیت وجود ندارد در نتیجه مشکلات و معایب مربوط به خازن های الکترولیت نیز در این ساختار وجود ندارد. ساختار پیشنهادی دارای تعداد کم عناصر سازنده از جمله IGBT و مدار راه انداز می باشد و برای تولید ولتاژ چندسطحی با تعداد سطوح بالا به تعداد کم منابع DC ایزوله نیاز دارد.

به دلیل اینکه اینورتر سه فاز پیشنهادی یک اینورتر چندسطحی می باشد در نتیجه تنش ولتاژ کلیدها در مقایسه با اینورترهای دوسطحی و سه سطحی کاهش یافته است. لذا این اینورتر برای کاربردهای توان و ولتاژ متوسط و بالا مناسب خواهد بود. لذا اینورتر چندسطحی سه فاز پیشنهادی را می توان در انتقال توان به صورت DC (HVDC)، درایو موتورها و به عنوان ادوات واسط بین انرژی های نو با شبکه برق نیز مورد استفاده قرار داد [۲۱ و ۲۲]. لازم به ذکر است که در این کاربردها تأمین منابع DC ایزوله و یا منابع DC با مقادیر مختلف و همچنین در کاربردهای انرژی های تجدیدپذیر امکان کنترل مستقل توان هریک از ورودی ها و استحصال بیشینه توان به عنوان یکی از مشکلات موجود وجود دارد.

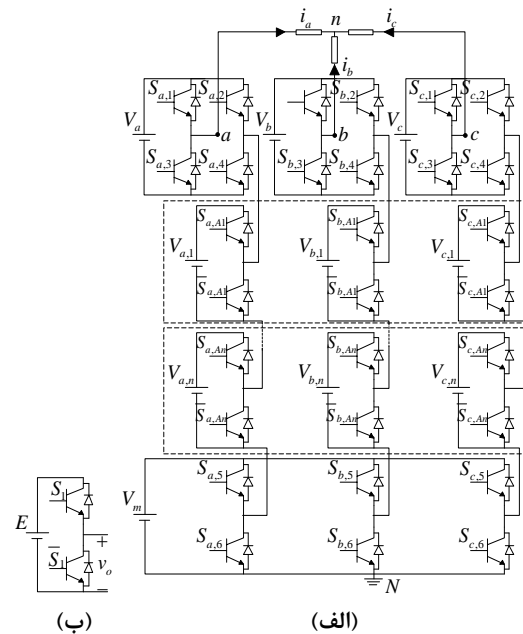
امروزه اینورترهای چندسطحی به دلیل مزایایی که در مقابل اینورترهای سه سطحی دارند بسیار مورد توجه می باشند [۱]. آن ها با استفاده از منابع DC با اندازه کوچک قادر به تولید ولتاژ چندسطحی سینوسی با THD پایین و دامنه بزرگ می باشند. همچنین کلیدهای قدرت در اینورترهای چندسطحی دارای تنش ولتاژ و فرکانس کلیدزنی پایین می باشند [۲، ۳]. همین ویژگی های ذکر شده موجب استفاده از اینورترهای چندسطحی در کاربرد ولتاژ متوسط و توان بالا شده است [۴-۶].

در انواع اینورترهای چندسطحی ارائه شده مرسوم، اینورترهای چندسطحی ارائه شده را می توان در دو گروه اینورترهایی متشکل از سلول های پایه مشابه و اینورترهایی متشکل از سلول های پایه مختلف (هیبریدی) دسته بندی کرد. همچنین هر یک از دو گروه ذکر شده را می توان به دو گروه اینورترهای چندسطحی با منابع DC ورودی با اندازه برابر و اینورترهای چندسطحی با منابع DC ورودی با اندازه نابرابر تقسیم کرد [۲۱-۴، ۲۸-۲۳].

ابتدا اینورترهای چندسطحی با نقطه خنثی (NPC)، سپس اینورترهای با خازن های شناور (FC) و اینورترهای با پل H (CHB) معرفی شده اند [۴-۷]. از عمده معایب اینورترهای چندسطحی NPC و FC می توان به تعداد زیاد دیود در ساختار اینورتر NPC و همچنین تعداد بالای خازن الکترولیت و پیچیدگی روش کنترلی برای متعادل نگه داشتن ولتاژ خازن ها در هر دو اینورتر اشاره کرد [۸، ۹]. از بزرگ ترین عیب های اینورتر CHB می توان به بالا بودن تعداد منابع DC جدا از هم برای تولید ولتاژ چندسطحی با تعداد سطوح بالا اشاره کرد. همه ساختارهای اشاره شده قابلیت تولید ولتاژ با سطوح بالا با استفاده از افزایش تعداد ساختار پایه را دارا می باشند. در سال های اخیر تعداد زیادی مقاله بر روی کاهش هر چه بیشتر تعداد عناصر سازنده سلول های پایه تمرکز کرده اند. در [۱۰] یک اینورتر سه فاز که قادر به تولید ولتاژ چندسطحی با استفاده از یک منبع DC می باشد، ارائه شده است. در ساختار این اینورتر برای تولید ولتاژ سه فاز چندسطحی خازن های الکترولیت وجود دارد. تعداد زیاد خازن الکترولیت در ساختار این اینورتر و همچنین نیاز به روش کنترلی پیچیده برای کنترل ولتاژ خازن ها از عمده معایب این اینورتر سه فاز می باشد. در [۱۱] اینورتر سه فاز چندسطحی بر اساس اینورتر نیم پل با منابع ولتاژ ورودی نابرابر ارائه شده است. در این اینورتر با سری کردن سلول های پایه می توان ولتاژ چندسطحی در خروجی تولید کرد. در این اینورتر سه فاز با ایجاد شیفت فاز و تفریق با ولتاژ تولیدی شاخه دیگر اینورتر سه فاز، قطب منفی ولتاژ خط به خط تولید می گردد. در [۱۲] اینورتر سه فاز بر مبنای اینورتر NPC ارائه شده است. این اینورتر در مقایسه با اینورتر مرسوم NPC تعداد کم دیود نیاز دارد. ولی برای تولید ولتاژ با تعداد سطوح بالا به تعداد زیاد خازن الکترولیت نیاز دارد. در [۱۳] اینورتر سه فاز بهبود یافته بر اساس اینورتر FC ارائه شده است. این اینورتر برای

۲- ساختار اینورتر پیشنهادی

در شکل ۱-الف) ساختار کلی اینورتر پیشنهادی جدید نشان داده شده است. این ساختار از نوع اینورتر هیبریدی می باشد که هدف از این ساختار کاهش تعداد ادوات الکترونیک قدرت برای تولید ولتاژ سه فاز چندسطحی است.



شکل ۱: الف) ساختار اینورتر چندسطحی سه فاز پیشنهادی، ب) ساختار سلول کمکی

همان طور که در شکل ۱-الف) مشاهده می شود، قسمت اصلی اینورتر پیشنهادی متشکل از سه اینورتر تک فاز تمام پل و یک اینورتر تمام پل سه فاز است. برای بالا بردن تعداد سطوح تولیدی از طبقات کمکی که یک اینورتر نیم پل است، مطابق شکل ۱-الف) استفاده شده است. ساختار سلول کمکی در شکل ۱-ب) نشان داده شده است. هر سلول کمکی از یک عدد منبع DC و دو عدد کلید قدرت تشکیل شده است، در نتیجه این سلول ساده بوده و کنترل آن برای تولید ولتاژ دلخواه و همچنین ترکیب آن با سایر سلول ها آسان می باشد، همچنین به دلیل اینکه در این سلول برای تولید ولتاژ در هر لحظه فقط یک کلید آن در مسیر جریان قرار دارد، لذا تلفات آن نیز کم خواهد بود. این سلول قادر به تولید دو سطح ولتاژ 0 و E می باشد. به دلیل جلوگیری از اتصال کوتاه شدن منبع DC ورودی، دو کلید S_1 و \bar{S}_1 نباید به طور همزمان هدایت کنند، لذا این دو کلید به حالت مکمل هم هدایت می کنند. در جدول ۱ کلیدزنی مربوط به سلول کمکی نشان داده شده است.

جدول ۱: حالات کلیدزنی سلول کمکی در اینورتر پیشنهادی

حالت	وضعیت کلیدها		V_o
	S_1	\bar{S}_1	
۱	ON	OFF	E
۲	OFF	ON	0

هر طبقه کمکی متشکل از شش کلید قدرت و سه منبع DC می باشد. در این ساختار، n تعداد طبقات کمکی می باشد. نوع ساختار اینورتر سه فاز چندسطحی پیشنهادی این امکان را به وجود می آورد که مقدار منابع ورودی به صورت نابرابر انتخاب شود. به همین دلیل این اینورتر جزء زیرمجموعه اینورترهای سه فاز چندسطحی با منابع DC ورودی نابرابر محسوب می شود. در این ساختار ولتاژ خط به خط طبق رابطه (۱) به دست می آید.

$$\begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_{aN} \\ v_{bN} \\ v_{cN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، v_{aN} ، v_{bN} و v_{cN} به ترتیب ولتاژ خروجی مربوط به شاخه a (Pole)، b و c می باشد. همچنین v_{ab} ، v_{bc} و v_{ca} به ترتیب ولتاژ خط به خط بین فاز a و b ، فاز b و c و فاز c و a می باشند. در این ساختار، طبق رابطه (۱) با تفریق ولتاژ هر شاخه با ولتاژ شاخه مجاور سطوح منفی ولتاژ خط به خط نیز تولید می گردد.

برای تولید بیشینه تعداد سطوح ولتاژ توسط اینورتر پیشنهادی، ولتاژ ورودی اینورترهای تمام پل تک فاز مربوط به هر شاخه مطابق رابطه (۲) انتخاب می شود.

$$V_a = V_b = V_c = E \quad (2)$$

اگر تعداد سلول های کمکی برابر صفر باشد، ولتاژ ورودی اینورتر تمام پل سه فاز (V_m) به صورت رابطه (۳) خواهد بود.

$$V_m = 3E \quad (3)$$

با توجه به ولتاژ اینورتر تمام پل تک فاز، ولتاژ سلول های کمکی به صورت رابطه (۴) انتخاب می شود.

$$V_{a,j} = V_{b,j} = V_{c,j} = 3 \times 2^{j-1} E \quad (4)$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, n$$

شاخه های a ، b و c هستند. در نهایت ولتاژ مربوط به اینورتر تمام پل سه فاز به صورت رابطه (۵) انتخاب می شود.

$$V_m = 3 \times 2^n E \quad (5)$$

با توجه به مقادیر انتخاب شده برای منابع DC ورودی این اینورتر سه فاز قادر به تولید تمام سطوح ولتاژ منفی و مثبت می باشد. بیشینه ولتاژ هر شاخه در این اینورتر برای هر سه شاخه با هم برابر و طبق رابطه (۶) می باشد.

$$\begin{aligned} V_{aN, \max} &= V_{bN, \max} = V_{cN, \max} \\ &= V_a + \sum_{j=1}^n 3 \times 2^{j-1} E + 3 \times 2^n E \\ &= E(1 + 3 + 3 \times 2 + \dots + 3 \times 2^{n-1} + 3 \times 2^n) \\ &= (1 + 3(2^{n+1} - 1))E \end{aligned} \quad (6)$$

تعداد سطوح تولیدی توسط هر شاخه ($N_{Level,p}$) برابر با رابطه (۷) است.

به شاخه‌های b و c همانند شاخه a می‌باشد، فقط با تفاوت اینکه کلیدزنی آن‌ها با اختلاف فاز 120° و 240° درجه نسبت به شاخه a صورت می‌گیرد. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود برای تولید سطح ولتاژ صفر و همچنین سطوح ولتاژ مضارب سه، حالات افزونی در اینورتر پیشنهادی وجود دارد که موجب افزایش قابلیت اطمینان اینورتر پیشنهادی می‌شود. پیشینه ولتاژ خطبه‌خط تولیدی در این اینورتر چندسطحی سه‌فاز به‌صورت رابطه (۸) می‌باشد.

$$\begin{aligned} V_{ab,\max} &= V_{bc,\max} = V_{ca,\max} \\ &= V_{aN,\max} + E = (1 + 3(2^{n+1} - 1))E + E \quad (8) \\ &= (2 + 3(2^{n+1} - 1))E \end{aligned}$$

رابطه تعداد سطوح ولتاژ هر شاخه با تعداد سطوح ولتاژ خطبه‌خط $(N_{level,L-L})$ مطابق رابطه (۹) می‌باشد.

$$N_{level,L-L} = 2N_{level,p} - 1 \quad (9)$$

در نتیجه تعداد ولتاژ خطبه‌خط این اینورتر طبق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} N_{level,L-L} &= 2 \times (3 \times 2^{n+1}) - 1 \\ &= 3 \times 2^{n+2} - 1 \quad (10) \end{aligned}$$

تعداد IGBTها (N_{IGBT}) ، تعداد مدارهای راه‌انداز (N_{driver}) و تعداد کلیدهای قدرت (N_{switch}) باهم برابر هستند و به‌صورت رابطه (۱۱) محاسبه می‌شوند.

$$N_{IGBT} = N_{switch} = N_{driver} = 18 + 6n \quad (11)$$

تعداد منابع DC ورودی اینورتر سه‌فاز پیشنهادی طبق رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$N_{source} = 4 + 3n \quad (12)$$

۳- روش کلیدزنی

در اینورترهای چندسطحی به دلیل تولید ولتاژ پله‌ای با تعداد سطح زیاد و شبیه بودن شکل موج تولیدی به شکل موج سینوسی و کم بودن تلفات کلیدزنی، روش مدولاسیون فرکانس پایه به روش‌های کلیدزنی با فرکانس بالا ترجیح داده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، شکل موج حاصل از این روش کلیدزنی به‌صورت پله‌ای می‌باشد. برای مثال برای تولید ولتاژ شش سطحی در خروجی هر شاخه با اختلاف فاز 120° درجه نسبت به هم و به‌تبع آن تولید ولتاژ یازده‌سطحی خطبه‌خط با اختلاف فاز 120° درجه نسبت به هم کلیدزنی قطب a و b مطابق جدول ۲ و شکل ۲ صورت می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، برای ایجاد ولتاژ سه‌فاز متعادل یازده‌سطحی خطبه‌خط در خروجی اینورتر، کلیدزنی دیگر قطب‌ها همانند قطب a می‌باشند و با 120° درجه اختلاف فاز نسبت به هم کلیدزنی می‌شوند.

$$\begin{aligned} N_{level,p} &= \frac{V_{aN,\max}}{E} + 2 = (1 + 3(2^{n+1} - 1)) + 2 \\ &= 3 \times 2^{n+1} \quad (7) \end{aligned}$$

برای توضیح بیشتر نحوه عملکرد اینورتر پیشنهادی، به‌عنوان مثال اگر n برابر صفر باشد، هر شاخه قادر به تولید ولتاژهای $-E$ ، 0 ، E ، $2E$ ، $3E$ و $4E$ خواهد بود که کلیدزنی مربوطه در جدول ۲ برای شاخه a آمده است.

جدول ۲: حالات کلیدزنی اینورتر پیشنهادی بدون طبقه کمکی

$(n=0)$

حالت	وضعیت کلیدها						$V_{a,o}$
	$S_{a,1}$	$S_{a,2}$	$S_{a,3}$	$S_{a,4}$	$S_{a,5}$	$S_{a,6}$	
۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	$-E$
۲	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰
۳	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰
۴	۱	۰	۰	۱	۰	۱	E
۵	۰	۱	۱	۰	۱	۰	$2E$
۶	۱	۱	۰	۰	۱	۰	$3E$
۷	۰	۰	۱	۱	۱	۰	$3E$
۸	۱	۰	۰	۱	۱	۰	$4E$

اگر در ساختار پیشنهادی از یک طبقه کمکی استفاده شود، هر شاخه قادر به تولید ولتاژ با سطوح $-E$ الی $10E$ با پله‌های E می‌باشد که در جدول ۳ برای شاخه a نشان داده شده است.

جدول ۳: حالات کلیدزنی اینورتر پیشنهادی با یک طبقه کمکی

$(n=1)$

حالت	وضعیت کلیدها								$V_{a,o}$
	$S_{a,1}$	$S_{a,2}$	$S_{a,3}$	$S_{a,4}$	$S_{a,5}$	$S_{a,6}$	$S_{a,A1}$	$\bar{S}_{a,A1}$	
۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۱	$-E$
۲	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰
۳	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰
۴	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	E
۵	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۰	$2E$
۶	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	$3E$
۷	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۰	$3E$
۸	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۰	$4E$
۹	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	$5E$
۱۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	$6E$
۱۱	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	$6E$
۱۲	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	$7E$
۱۳	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	$8E$
۱۴	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	$9E$
۱۵	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	$9E$
۱۶	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰	$10E$

در جدول ۲ و جدول ۳ اعداد ۰ و ۱ به ترتیب نشان‌دهنده عدم هدایت یا هدایت کلید مربوطه می‌باشد. همچنین نحوه کلیدزنی مربوط

$$\begin{aligned}
 V_{stress,a} &= \sum_{i=1}^4 V_{stress,Sa_i} + \sum_{i=1}^n V_{stress,Sa_i} + \sum_{i=1}^n V_{stress,\bar{S}a_i} \\
 &+ \sum_{i=5}^6 V_{stress,Sa_i} = \sum_{i=1}^4 E + 2 \sum_{i=1}^n V_{a,i} + \sum_{i=5}^6 V_m \\
 &= 4E + 2 \left(\sum_{i=1}^n 3 \times 2^{i-1} E \right) + 2 \times (3 \times 2^n E) \\
 &= 4E + 2 \times 3(2^{n+1} - 1)E \\
 &= (3 \times 2^{n+2} - 2)E
 \end{aligned} \tag{16}$$

لازم به ذکر است، در این ساختار تنش ولتاژ کلیدهای متناظر در شاخه‌های a ، b و c باهم برابر می‌باشد. در نتیجه تنش ولتاژ هر سه شاخه طبق رابطه (۱۷) باهم برابر است.

$$V_{stress,a} = V_{stress,b} = V_{stress,c} = (3 \times 2^{n+2} - 2)E \tag{17}$$

$V_{stress,c}$ و $V_{stress,b}$ به ترتیب تنش ولتاژ شاخه b و c می‌باشد. تنش ولتاژ کل اینورتر سه‌فاز (V_{stress}) طبق رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود.

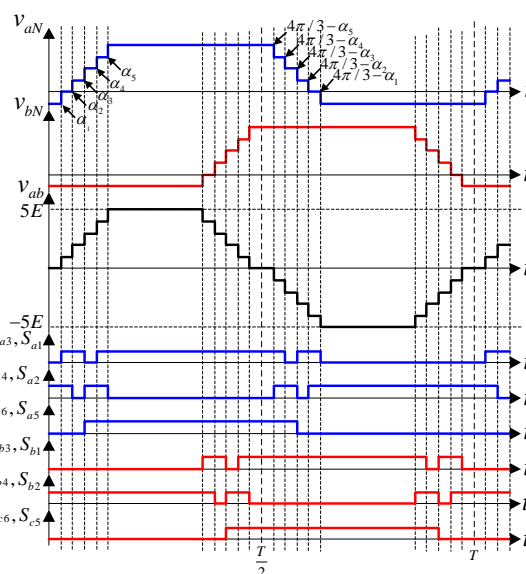
$$V_{stress} = 3 \times V_{stress,a} = 3 \times (3 \times 2^{n+2} - 2)E \tag{18}$$

لازم به ذکر است که در هر اینورتر که در آن تنش ولتاژ کلیدهای آن کم باشد، آن اینورتر در ولتاژ ورودی یکسان نسبت به اینورترهای دیگر از کلیدهای ارزان‌تر و با سطح تحمل ولتاژ کمتر می‌تواند استفاده کند.

۵- مقایسه ساختار پیشنهادی با برخی ساختارهای موجود

برای نشان دادن ویژگی‌های اینورتر سه‌فاز چندسطحی پیشنهادی، این اینورتر با اینورترهای سه‌فاز ارائه‌شده در سال‌های اخیر و رایج مقایسه می‌شود. مطابق جدول ۴ برای مقایسه اینورترها برای هر یک از اینورترهای ارائه‌شده نماد R_1 الی R_{13} در نظر گرفته شده است. برای اینورتر ارائه‌شده در [۲۰]، سه روش برای تعیین اندازه منابع DC ورودی ارائه شده است که به ترتیب با نماد R_4 ، R_5 و R_6 نشان داده شده است. همچنین برای اینورتر سه‌فاز ارائه‌شده در [۲۷] که از نوع پل H است، سه روش برای تعیین اندازه منابع DC ورودی که عبارت‌اند از متقارن (Symmetric)، دوتایی (Binary) و سه‌تایی (Trinary)، ارائه شده است که به ترتیب با R_{10} ، R_{11} و R_{12} نشان داده شده‌اند. در جدول ۴ تعداد IGBTها، تعداد مدارهای راه‌انداز، تعداد منابع DC ورودی و همچنین تنوع منابع DC مورد استفاده برای تولید سطوح ولتاژ خروجی ($N_{variety}$) و تنش ولتاژ ساختارها برحسب تعداد سطوح ولتاژ مربوط به هر شاخه (Pole) نشان داده شده است. در شکل ۳ تعداد IGBTهای استفاده‌شده در اینورتر پیشنهادی و اینورترهای انتخاب‌شده برای مقایسه، برحسب تعداد سطوح تولیدی توسط هر شاخه مشاهده می‌شود.

در این روش برای بهبود شکل موج خروجی و کاهش THD ولتاژ خروجی، برای تعیین زوایای α_1 تا α_5 از روش SHE استفاده می‌شود. [۲۳]



شکل ۲: الگوی کلیدزنی برای تولید ولتاژ خط به خط یازده‌سطحی با استفاده از مدولاسیون فرکانس پایین

۴- محاسبه تنش ولتاژ کلیدها در ساختار پیشنهادی

بیش‌ترین ولتاژی که در حالت خاموش روی دو سر هر کلید قرار می‌گیرد به‌عنوان تنش ولتاژ هر کلید در نظر گرفته می‌شود. در اینورتر تمام‌پل، تنش ولتاژ کلیدهای $S_{a,1}$ ، $S_{a,2}$ ، $S_{a,3}$ و $S_{a,4}$ که به ترتیب $V_{stress,Sa1}$ ، $V_{stress,Sa2}$ ، $V_{stress,Sa3}$ و $V_{stress,Sa4}$ نام‌گذاری می‌شوند، طبق رابطه (۱۳) به دست می‌آیند.

$$V_{stress,Sa1} = V_{stress,Sa2} = V_{stress,Sa3} = V_{stress,Sa4} = V_a \tag{13}$$

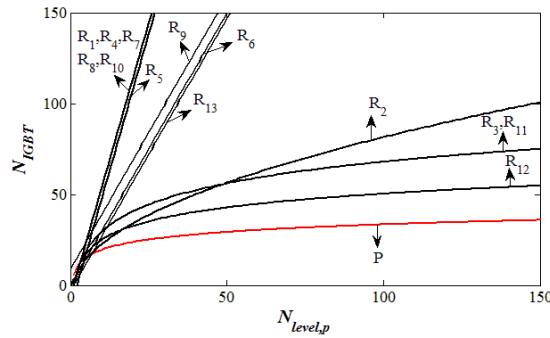
همچنین تنش ولتاژ کلیدهای مربوط به سلول‌های کمکی به‌صورت رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود.

$$V_{stress,SaAn} = V_{stress,\bar{S}aAn} = V_{a,n} \tag{14}$$

در رابطه (۱۴) $V_{stress,SaAn}$ و $V_{stress,\bar{S}aAn}$ به ترتیب تنش کلید $S_{a,An}$ و $\bar{S}_{a,An}$ می‌باشد. در اینورتر سه‌فاز پیشنهادی تنش ولتاژ کلیدهای $S_{a,5}$ و $S_{a,6}$ که مربوط به شاخه a هستند به ترتیب $V_{stress,Sa5}$ و $V_{stress,Sa6}$ می‌باشند که طبق رابطه (۱۵) محاسبه می‌شوند.

$$V_{stress,Sa5} = V_{stress,Sa6} = V_m \tag{15}$$

تنش ولتاژ کل شاخه a ($V_{stress,a}$) توسط رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود.

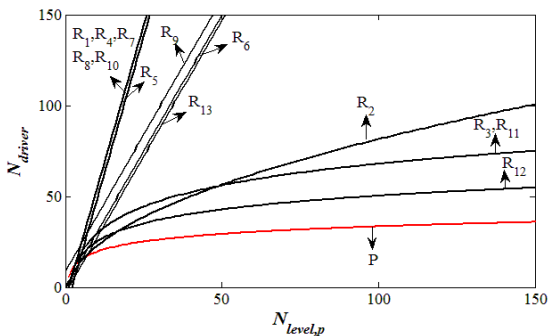


شکل ۳: تعداد IGBTها برحسب تعداد سطوح ولتاژ شاخه ($N_{level,p}$)

جدول ۴: مشخصات اینورتر پیشنهادی و اینورترهای مورد مقایسه

انواع اینورتر	N_{IGBT}, N_{driver}	N_{diode}	N_{source}	$N_{variety}$	$N_{transformer}$	V_{stress}	THD ولتاژ و جریان
R_1 , [۴]	$6(N_{level,p} - 1)$	$6(N_{level,p} - 2)$	$N_{level,p} - 1$	۱	-	$6(N_{level,p} - 1)V_{dc}$	مشابه
R_2 , [۱۱]	$3(-1 + \sqrt{-7 + 8N_{level,p}})$	-	$3(\frac{-1 + \sqrt{-7 + 8N_{level,p}}}{2})$	$\frac{-1 + \sqrt{-7 + 8N_{level,p}}}{2}$	-	$6(N_{level,p} - 1)V_{dc}$	مشابه
R_3 , [۱۹]	$\frac{12(\ln(\frac{N_{level,p} + 1}{2}))}{\ln 2}$	۶	$\frac{3\ln(\frac{N_{level,p} + 1}{2})}{\ln 2} - 1$	$\frac{\ln(\frac{N_{level,p} + 1}{2})}{\ln 2}$	-	$6(N_{level,p} - 1)V_{dc}$	مشابه
R_4 , [۲۰]	$6(N_{level,p} - 1)$	-	$3N_{level,p} - 4$	۲	-	$6(N_{level,p} - 1)V_{dc}$	مشابه
R_5 , [۲۰]	$6(N_{level,p} - 2)$	-	$3N_{level,p} - 7$	۱	-	$6(N_{level,p} - 1)V_{dc}$	مشابه
R_6 , [۲۰]	$3N_{level,p}$	-	$\frac{3}{2}N_{level,p} - 1$	۲	-	$6(N_{level,p} - 1)V_{dc}$	مشابه
R_7 , [۲۴]	$6(N_{level,p} - 1)$	-	$3(N_{level,p} - 1)$	۱	-	$6(N_{level,p} - 1)V_{dc}$	مشابه
R_8 , [۲۵]	$6(N_{level,p} - 1)$	-	$3N_{level,p} - 5$	۱	-	$6(2N_{level,p} - 3)V_{dc}$	مشابه
R_9 , [۲۶]	$3(N_{level,p} + 3)$	-	$\frac{N_{level,p} - 1}{2}$	۱	۳	$9(N_{level,p} - 1)V_{dc}$	مشابه
R_{10} , [۲۷]	$6(N_{level,p} - 1)$	-	$\frac{3}{2}(N_{level,p} - 1)$	۱	-	$6(N_{level,p} - 1)V_{dc}$	مشابه
R_{11} , [۲۷]	$12(\frac{\ln(N_{level,p} + 1)}{\ln 2} - 1)$	-	$3(\frac{\ln(N_{level,p} + 1)}{\ln 2} - 1)$	$\frac{\ln(N_{level,p} + 1)}{\ln 2} - 1$	-	$6(N_{level,p} - 1)V_{dc}$	مشابه
R_{12} , [۲۷]	$\frac{12\ln(N_{level,p})}{\ln 3}$	-	$\frac{3\ln(N_{level,p})}{\ln 3}$	$\frac{\ln(N_{level,p})}{\ln 3}$	-	$6(N_{level,p} - 1)V_{dc}$	مشابه
R_{13} , [۲۸]	$3(N_{level,p} + 1)$	-	$\frac{3}{2}(N_{level,p} - 1)$	۱	-	$6(N_{level,p} - 1)V_{dc}$	مشابه
اینورتر پیشنهادی (P)	$6(1 + \frac{2N_{level,p}}{\ln 2})$	-	$\frac{3\ln(\frac{2N_{level,p}}{3})}{\ln 2} - 2$	$\frac{\ln(\frac{2N_{level,p}}{3})}{\ln 2}$	-	$6(N_{level,p} - 1)V_{dc}$	مشابه

ترانسفورماتور نیز می‌باشند. در شکل ۵ تعداد منابع DC برحسب تعداد سطوح تولیدی توسط هر شاخه مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۴: تعداد مدار راه‌انداز برحسب تعداد سطوح ولتاژ شاخه ($N_{level,p}$)

با توجه به شکل ۳ اینورتر پیشنهادی تعداد کمی IGBT برای تولید سطوح مشخص ولتاژ نسبت به دیگر اینورترها نیاز دارد. در شکل ۴، تعداد مدار راه‌انداز برحسب تعداد سطوح تولیدی توسط هر شاخه باهم مقایسه شده است.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، اینورتر چندسطحی پیشنهادی به تعداد کم مدار راه‌انداز نسبت به دیگر اینورترهای سه‌فاز نیاز دارد. به دلیل اینکه تعداد IGBT و تعداد مدار راه‌انداز با قیمت و حجم اینورتر رابطه مستقیم دارد، در نتیجه کاهش تعداد IGBT و مدار راه‌انداز موجب کاهش هزینه و حجم اینورتر سه‌فاز پیشنهادی می‌شود. همچنین در بین اینورترهای مقایسه‌شده با توجه به جدول ۴، اینورترهای R_1 و R_3 دارای دیود و اینورتر R_9 دارای سه عدد

با توجه به مقایسه صورت گرفته تنش ولتاژ تمام اینورترهای مورد مقایسه به جز R_8 و R_9 باهم برابر و در شرایط بهتری نسبت به R_8 و R_9 قرار دارند.

به دلیل اینکه THD ولتاژ به تعداد پله و نوع مدولاسیون بستگی دارد و THD جریان به جز تعداد سطوح ولتاژ و نوع مدولاسیون به بار نیز بستگی دارد، در نتیجه THD ولتاژ و جریان خروجی تمام اینورترهای مورد مقایسه در صورتی که ولتاژ با تعداد سطوح مساوی با اینورتر پیشنهادی تولید کنند و روش مدولاسیون و بار خروجی یکسان در آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد باهم برابر خواهند شد [۲۹].

۶- بررسی و مقایسه تلفات

در این قسمت تلفات مربوط به اینورتر پیشنهادی بررسی می‌گردد. تلفات IGBT و دیود در حالت کلی شامل دو نوع تلفات هدایتی و تلفات کلیدزنی است. تلفات هدایتی حاصل از مقاومت معادل و افت ولتاژ در حالت هدایت عنصر نیمه‌هادی است. تلفات کلیدزنی مربوط به عملکرد غیر ایده‌آل کلید قدرت می‌باشد. در نتیجه مجموع تلفات به صورت رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود [۳۰، ۳].

$$P_{total, loss} = P_{sw} + P_{con} \quad (19)$$

در این قسمت تلفات مربوط به اینورتر پیشنهادی بررسی می‌گردد. تلفات IGBT و دیود در حالت کلی شامل دو نوع تلفات هدایتی و تلفات کلیدزنی است. تلفات هدایتی حاصل از مقاومت معادل و افت ولتاژ در حالت هدایت عنصر نیمه‌هادی است. تلفات کلیدزنی مربوط به عملکرد غیر ایده‌آل کلید قدرت می‌باشد. در نتیجه مجموع تلفات به صورت رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود [۳۰، ۳].

$$P_{con,T}(t) = V_T i(t) + R_T i^{(\alpha+1)}(t) \quad (20)$$

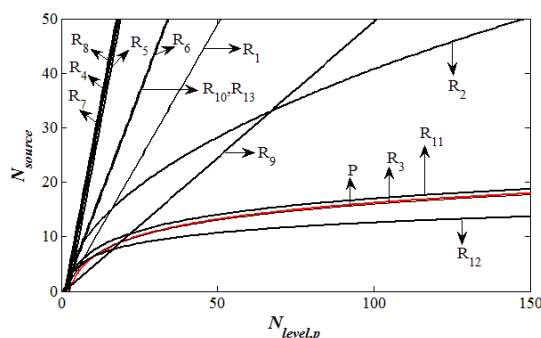
$$P_{con,D}(t) = V_D i(t) + R_D i^2(t) \quad (21)$$

در رابطه‌های (۲۰) و (۲۱) R_T و R_D به ترتیب مقاومت معادل ترانزیستور و دیود می‌باشند. α یک مقدار ثابت است که بر اساس مشخصه کلید تعیین می‌شود. V_D و V_T به ترتیب افت ولتاژ مربوط به ترانزیستور و دیود هستند. همچنین $i(t)$ جریانی است که از کلیدها عبور می‌کند. با توجه به عبور جریان از ترانزیستور و دیود در هر لحظه، میانگین تلفات هدایتی برابر رابطه (۲۲) خواهد بود.

$$P_{con} = \frac{1}{2\pi} \left(\int_0^{2\pi} \sum_{j=1}^{N_{switch}} P_{conT,j}(t) dt + \int_0^{2\pi} \sum_{j=1}^{N_{switch}} P_{conD,j}(t) dt \right) \quad (22)$$

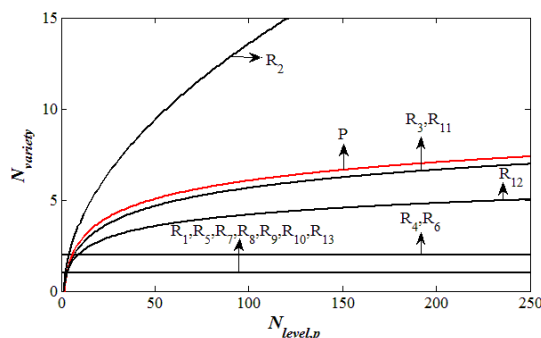
در رابطه (۲۲) $P_{conD,j}(t)$ و $P_{conT,j}(t)$ به ترتیب تلفات هدایتی لحظه‌ای کلید j ام و دیود مربوط به آن می‌باشند. همچنین N_{switch} تعداد کل کلیدها می‌باشد.

تلفات کلیدزنی در هنگام کلیدزنی (روشن و خاموش شدن کلیدهای قدرت) اتفاق می‌افتد. برای ساده شدن محاسبه ولتاژ و جریان هنگام کلیدزنی، روابط به صورت خطی در نظر گرفته می‌شود. بر اساس این فرض، تلفات کلیدزنی به صورت روابط (۲۳) و (۲۴) محاسبه می‌شوند.



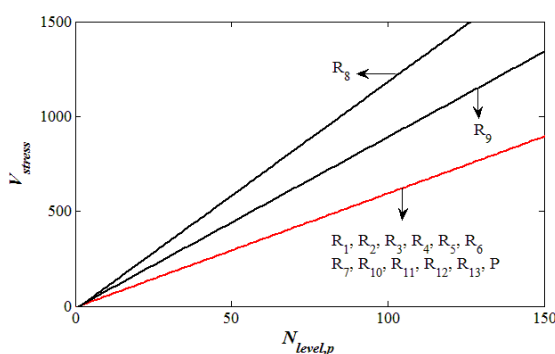
شکل ۵: تعداد منابع DC ورودی بر حسب تعداد سطوح ولتاژ شاخه ($N_{level,p}$)

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود اینورتر R_{12} در شرایط بهتری نسبت به دیگر اینورترها قرار دارد و بعد از اینورتر R_{12} اینورتر R_3 و اینورتر پیشنهادی دارای کم‌ترین تعداد منابع DC می‌باشند. یکی دیگر از معیارهای مقایسه اینورترهای چندسطحی، تنوع منابع DC برای تولید سطوح ولتاژ است. این مقایسه در شکل ۶ انجام گرفته است.



شکل ۶: تنوع منابع DC ورودی بر حسب تعداد سطوح ولتاژ شاخه ($N_{level,p}$)

با توجه به شکل ۶ اینورترهای $R_1, R_5, R_7, R_8, R_9, R_{10}$ و R_{13} دارای منابع یکسان هستند. همچنین لازم به ذکر است، برای ایجاد منابع ولتاژ DC ورودی، معمولاً از یک منبع تک‌فاز یا سه‌فاز AC، یک ترانسفورماتور چند خروجی و چند یک‌سوساز استفاده می‌شود که با این روش مشکل حاصل از تنوع منابع ورودی تا حدی مرتفع می‌گردد در شکل ۷ تنش ولتاژ توسط ساختارهای دیگر و اینورتر پیشنهادی مقایسه شده است.



شکل ۷: تنش ولتاژ اینورترها بر حسب تعداد سطوح ولتاژ شاخه ($N_{level,p}$)

$$P_{sw} = f \left(\sum_{J=1}^{N_{switch}} \sum_{k=1}^{N_{on,J}} E_{on,J,k} + \sum_{J=1}^{N_{switch}} \sum_{k=1}^{N_{off,J}} E_{off,J,k} \right) \quad (25)$$

در رابطه (۲۵) تلفات انرژی در هنگام روشن شدن k ام و $E_{on,J,k}$ تلفات انرژی در هنگام خاموش شدن k ام کلید J ام است. f فرکانس پایه است. $N_{on,J}$ و $N_{off,J}$ تعداد دفعات روشن و خاموش شدن کلید J ام در طول زمان فرکانس پایه می‌باشد. در نهایت بازده اینورتر سه‌فاز پیشنهادی با استفاده از رابطه (۲۶) محاسبه می‌شود.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{total,loss}} \quad (26)$$

برای تحلیل عملکرد اینورتر پیشنهادی از دیدگاه تلفات، این اینورتر با اینورترهای R_1 الی R_{13} مقایسه می‌شود. در این مقاله فرض می‌شود که روش کنترلی از نوع روش کنترلی فرکانس پایه می‌باشد.

$$E_{off,J} = \int_0^{t_{off}} v(t)i(t)dt = \int_0^{t_{off}} \left[\left(\frac{V_{sw,J}}{t_{off}} t \right) \left(-\frac{I_J}{t_{off}} (t - t_{off}) \right) \right] dt \quad (23)$$

$$= \frac{1}{6} V_{sw,J} I_J t_{off}$$

$$E_{on,J} = \int_0^{t_{on}} v(t)i(t)dt = \int_0^{t_{on}} \left[\left(\frac{V_{sw,J}}{t_{on}} t \right) \left(-\frac{I_J}{t_{on}} (t - t_{on}) \right) \right] dt \quad (24)$$

$$= \frac{1}{6} V_{sw,J} I_J t_{on}$$

$E_{on,J}$ و $E_{off,J}$ به ترتیب تلفات خاموش شدن و روشن شدن کلید J ام می‌باشند. ولتاژ دو سر کلید در حالت خاموش است. I_J جریان عبوری از کلید J ام قبل از خاموش شدن و I_J' جریان عبوری از کلید J ام بعد از روشن شدن کلید است. تلفات کلیدزنی برابر جمع تمامی تلفات انرژی خاموش شدن و روشن شدن کلید در فرکانس پایه ولتاژ خروجی است؛ بنابراین میانگین تلفات کلیدزنی طبق رابطه (۲۵) محاسبه می‌شود.

جدول ۵: مقایسه تعداد کلیدهای موجود در مسیر جریان بار و شاخص K

اینورتر	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	R_9	R_{10}	R_{11}	R_{12}	R_{13}	اینورتر پیشنهادی
$N_{level,p}$	۲۵	۲۲	۳۱	۲۴	۲۵	۲۲	۲۵	۲۴	۲۵	۲۵	۳۱	۲۷	۲۵	۲۴
تعداد کلیدها موجود در مسیر جریان بار (N_{cond})	۲۴	۶	۸	۲۳	۲۳	۱۱	۲۴	۲۳	۹.۶	۲۴	۸	۶	۱۳	۵
K	۰/۹۶	۰/۲۷۲	۰/۲۵۸	۰/۹۵۸	۰/۹۲	۰/۵۰	۰/۹۶	۰/۹۵۸	۰/۳۸۴	۰/۹۶	۰/۲۵۸	۰/۲۲۲	۰/۵۲	۰/۲۰۸

جدول ۶: شاخص K بر حسب تعداد سطح

انواع اینورتر	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7
K	$\frac{N_{level,p} - 1}{N_{level,p}}$	$\frac{-1 + \sqrt{-7 + 8N_{level,p}}}{2N_{level,p}}$	$\frac{2 \ln(\frac{N_{level,p} + 1}{2})}{N_{level,p} \ln 2}$	$\frac{N_{level,p} - 1}{N_{level,p}}$	$\frac{N_{level,p} - 2}{N_{level,p}}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{N_{level,p} - 1}{N_{level,p}}$
انواع اینورتر	R_8	R_9	R_{10}	R_{11}	R_{12}	R_{13}	اینورتر پیشنهادی (P)
K	$\frac{N_{level,p} - 1}{N_{level,p}}$	$\frac{N_{level,p}^2 + 14N_{level,p} - 15}{4N_{level,p}^2}$	$\frac{N_{level,p} - 1}{N_{level,p}}$	$\frac{2 \ln(\frac{N_{level,p} + 1}{2})}{N_{level,p} \ln 2}$	$\frac{2 \ln(N_{level,p})}{N_{level,p} \ln 3}$	$\frac{N_{level,p} + 1}{2N_{level,p}}$	$\frac{\ln(\frac{4N_{level,p}}{3})}{N_{level,p} \ln 2}$

در این حالت می‌توان از تلفات کلیدزنی صرف‌نظر کرد و فقط تلفات هدایتی را در نظر گرفت [۳۱]. همچنین فرض می‌شود که اینورترها در شرایط یکسان قرار دارند و مشخصه تمام کلیدهای به‌کاربرده شده در اینورترها برابر در نظر گرفته شده است. همچنین بیشینه ولتاژ خطبه‌خط تولیدی توسط هر اینورتر برابر E و بار هر اینورتر، یک بار سه‌فاز متعادل اهمی-سلفی با اندازه برابر می‌باشد. در نتیجه به دلیل برابر بودن بار و ولتاژ هر فاز، جریان بار برای تمام اینورترها برابر است. در حالت کلی تلفات اینورترها از تعداد کلیدهای قدرت موجود در مسیر جریان بار برای تولید هر سطح ولتاژ ناشی می‌شود. با توجه به بررسی اینورتر پیشنهادی و اینورترهای مورد مقایسه، مشاهده گردید که به‌جز اینورتر R_9 ، در تمامی اینورترهای دیگر جریان بار در هر لحظه به ازای تمامی سطوح ولتاژ خروجی صرفاً از تعداد یکسانی کلید عبور می‌کند که این تعداد در اینورترهای مختلف متفاوت است. برای مثال مقایسه تعداد کلید موجود

در مسیر جریان بار در اینورتر پیشنهادی در صورت تولید ولتاژ بیست و چهار سطحی در هر شاخه با اینورترهای دیگر همانند جدول ۵ می‌باشد. لازم به ذکر است که در این جدول فرض شده است تمامی اینورترها بیشترین تعداد سطح ولتاژ نزدیک به ۲۴ را تولید می‌نمایند. همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، در اینورتر پیشنهادی برای تولید ولتاژ بیست و چهار سطحی در هر شاخه، تنها ۵ کلید برای تولید هر سطح هدایت می‌کنند. با توجه به این نکته که در اینورتر R_9 برای تولید سطوح مختلف، تعداد متفاوتی کلید در مسیر جریان بار قرار می‌گیرند، مقدار متوسط تعداد کلید موجود در مسیر جریان بار برای اینورتر R_9 که به‌صورت رابطه (۲۷) محاسبه می‌شود در نظر گرفته شده است.

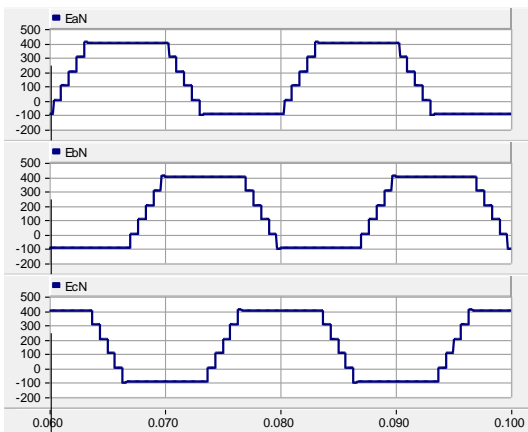
$$N_{cond,ave} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{level,p}} N_{cond,i}}{N_{level,p}} \quad (27)$$

مقادیر مربوط به منابع DC ورودی و همچنین بار R-L مورد استفاده در شبیه سازی در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷: مقادیر استفاده شده در شبیه سازی

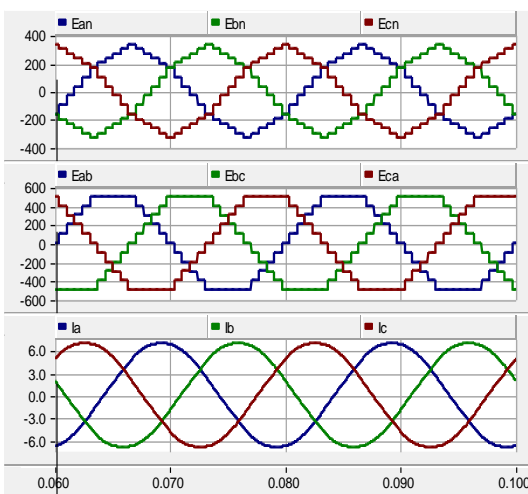
پارامتر	مقادیر	
	۱۱ سطحی	۲۳ سطحی
$V_a = V_b = V_c$	ولت ۱۰۰	ولت ۱۰۰
$V_{a,i} = V_{b,i} = V_{c,i}$	-	ولت ۳۰۰
V_m	ولت ۳۰۰	ولت ۶۰۰
R	اهم ۳۰	اهم ۳۰
L	۱۰۰ میلی هانری	۱۰۰ میلی هانری

در شکل ۹ ولتاژ پنج سطحی مربوط به هر شاخه (v_{aN}, v_{bN}, v_{cN}) و نشان داده شده است. کمینه ولتاژ هر شاخه برابر ۱۰۰- ولت و بیشینه ولتاژ برابر ۴۰۰ ولت می باشد.



شکل ۹: به ترتیب از بالا به پایین: ولتاژ شاخه a، شاخه b و شاخه c

در شکل ۱۰ ولتاژ هر سه فاز a، b و c و همچنین ولتاژ خط به خط یازده سطحی و جریان مربوط به هر فاز نشان داده شده است.



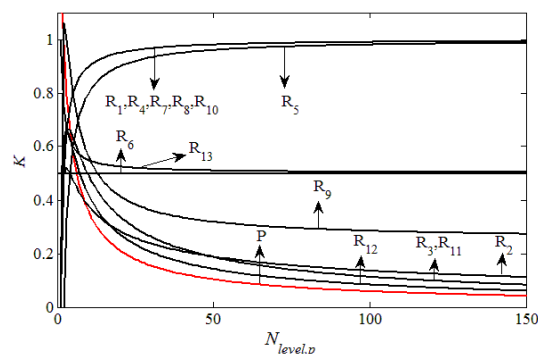
شکل ۱۰: به ترتیب از بالا به پایین: ولتاژ فاز، ولتاژ خط به خط و جریان مربوط به هر فاز

$N_{cond,ave}$ متوسط کلیدهای موجود در مسیر جریان بار در هر شاخه است. $N_{cond,i}$ تعداد کلیدهای موجود در مسیر جریان بار برای تولید سطح i ام می باشد. لازم به ذکر است که i برابر ۱ متناظر با کمترین سطح و i برابر $N_{level,p}$ متناظر با بیشترین سطح می باشد. لذا مقدار متوسط کلیدهای موجود در مسیر جریان R_9 در این مثال ۹/۶ خواهد بود.

به دلیل اینکه اینورترها تعداد برابر سطوح تولید نمی کنند برای مقایسه اینورترها در شرایط مساوی علاوه بر برابر بودن بار، بیشینه ولتاژ خط به خط تولیدی توسط هر اینورتر و مشخصه کلیدها، شاخص K طبق رابطه (۲۸) تعریف می شود.

$$K = \frac{N_{cond}}{N_{level,p}} \quad (28)$$

N_{cond} تعداد کلیدهای موجود در مسیر جریان بار در هر شاخه در هر لحظه می باشد. برای محاسبه شاخص K برای اینورتر R_9 در رابطه (۲۸) از $N_{cond,ave}$ استفاده می شود. با استفاده از این رابطه تعداد کلیدهایی که برای تولید هر یک سطح ولتاژ خروجی در مسیر جریان قرار می گیرند به دست می آید. هر چقدر این شاخص پایین باشد نشان دهنده آن است که تعداد کمتری کلید در مسیر جریان هستند و در نتیجه تلفات آن اینورتر کم تر است. رابطه K بر حسب تعداد سطوح تولیدی در هر شاخه برای اینورتر پیشنهادی و اینورترهای مورد مقایسه در جدول ۶ مشاهده می شود. همچنین در شکل ۸ نمودار شاخص K بر حسب تعداد سطوح تولیدی در هر شاخه برای اینورتر پیشنهادی و اینورترهای R_1 الی R_{13} آورده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، اینورتر پیشنهادی دارای مقدار کم تر K نسبت به دیگر اینورترهای سه فاز می باشد. لذا اینورتر پیشنهادی از نقطه نظر تلفات در شرایط مطلوب تری نسبت به دیگر اینورترها قرار دارد.



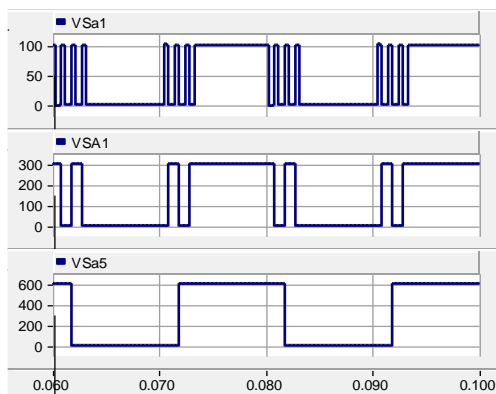
شکل ۸: مقایسه شاخص K بر حسب تعداد سطح هر شاخه $(N_{level,p})$

۷- نتایج شبیه سازی و عملی

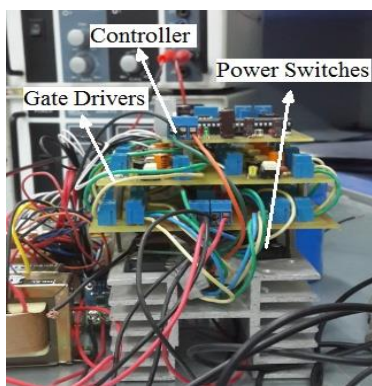
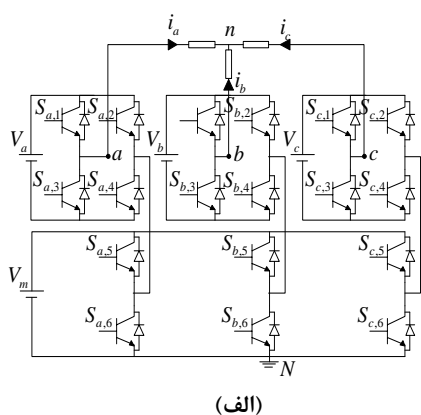
در این قسمت برای نشان دادن عملکرد صحیح اینورتر چندسطحی سه فاز پیشنهادی نتایج مربوط به شبیه سازی و نتایج حاصل از نمونه آزمایشگاهی آورده شده است. شبیه سازی برای تولید ولتاژ خط به خط یازده سطحی و ولتاژ خط به خط بیست و سه سطحی انجام گرفته است.

شبه‌سازی، مورد استفاده قرار گرفته است. مدار قدرت مورد استفاده در نمونه آزمایشگاهی و مدار عملی نمونه آزمایشگاهی برای تولید ولتاژ خطبه‌خط یازده‌سطحی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در نمونه آزمایشگاهی از IGBT BUP306D (با دیود موازی معکوس داخلی و ولتاژ و جریان بیشینه قابل تحمل ۱۲۰۰ ولت و ۲۳ آمپر) برای کلیدهای قدرت و از میکروکنترلر AVR ATMEGA 32 برای کنترل این کلیدهای قدرت استفاده شده است.

مقادیر عناصر استفاده‌شده در نمونه آزمایشگاهی مطابق جدول ۸ خواهد بود.



شکل ۱۲: به ترتیب از بالا به پایین: تنش ولتاژ کلیدهای $S_{a,1}$ ، $S_{a,4}$ و $S_{a,5}$

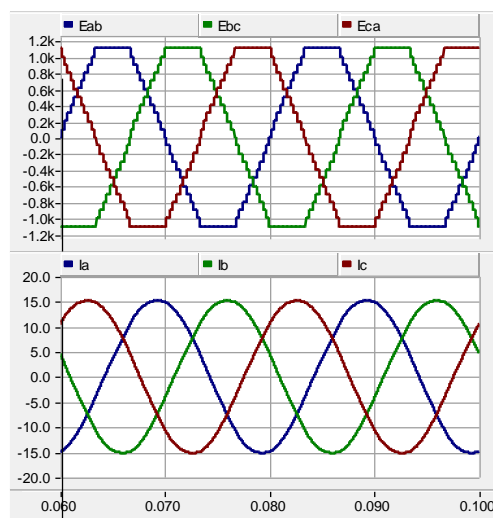


شکل ۱۳: اینورتر سه‌فاز پیشنهادی برای تولید ولتاژ یازده‌سطحی خطبه‌خط: (الف) شماتیک قدرت نمونه آزمایشگاهی، (ب) مدار عملی نمونه آزمایشگاهی

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، ولتاژ خطبه‌خط متشکل از ۵ سطح مثبت، ۵ سطح منفی و یک سطح صفر می‌باشد که فاصله هر سطح با هم برابر می‌باشد. در این شکل مقدار بیشینه و کمینه ولتاژ خطبه‌خط با هم برابر و مساوی ۵۰۰ ولت می‌باشد.

در شکل ۱۱ ولتاژ سه‌فاز خطبه‌خط بیست‌وسه‌سطحی و جریان‌های مربوطه برای هر فاز نشان داده شده است.

در شکل ۱۱ مقدار بیشینه و کمینه ولتاژ خطبه‌خط ۱۱۰۰ ولت می‌باشد. در شکل ۱۰ و ۱۱ به دلیل بالا بودن تعداد سطوح ولتاژ خروجی و با توجه به اینکه بار بیش‌تر سلفی است و به‌صورت فیلتر پایین‌گذر عمل می‌کند، شکل موج جریان بار سینوسی می‌باشد. همچنین به دلیل اینکه کلیدهای قدرت استفاده‌شده در ساختار پیشنهادی از نوع یک‌طرفه ولتاژ و دوطرفه جریان می‌باشند، جریان در هر دو جهت قادر به عبور از کلیدها می‌باشد. لذا با توجه به این ویژگی، اینورتر پیشنهادی در بارهای سلفی بزرگ به‌درستی کار خواهد کرد.



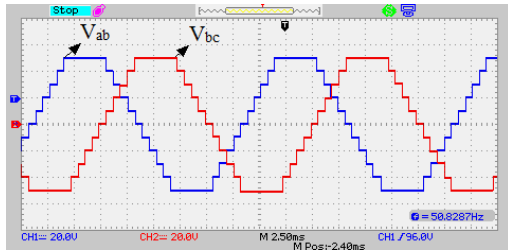
شکل ۱۱: به ترتیب از بالا به پایین: ولتاژ خطبه‌خط سه‌فاز و جریان مربوط به هر فاز

همچنین به جهت اینکه از نقطه نول اینورتر سه‌فاز پیشنهادی به نقطه نول بار ستاره وصل نشده است، در نتیجه می‌توان بار معادل مثلث را جایگزین بار ستاره کرد و اینورتر در این صورت بدون مشکل کار خواهد کرد.

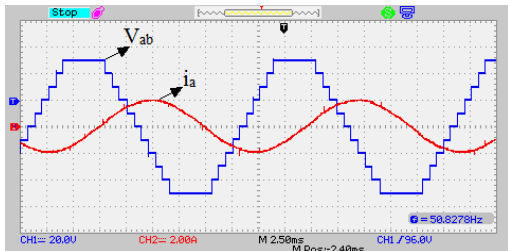
لازم به ذکر است، کلیدهای موجود در هر شاخه همیشه به‌صورت مکمل هم عمل می‌کنند و در هر حالت و در صورت غیرخطی شدن بار، منابع DC موجود در اینورتر پیشنهادی اتصال کوتاه نخواهند شد. به دلیل اینکه تنش ولتاژ کلیدهای متناظر در هر شاخه با هم برابر است، فقط تنش ولتاژ کلیدهای شاخه a در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود تنش ولتاژ هر کلید برابر ولتاژ DC مربوطه می‌باشد.

همچنین نمونه آزمایشگاهی اینورتر پیشنهادی ساخته‌شده و برای تأیید مطالعات تئوری انجام‌گرفته در بخش‌های قبل و نتایج



شکل ۱۶: شکل موج ولتاژ خطبه خط بین فاز a و b (V_{ab}) و فاز b و c (V_{bc}) در نمونه آزمایشگاهی



شکل ۱۷: شکل موج ولتاژ خطبه خط V_{ab} و جریان فاز a در نمونه آزمایشگاهی

همان طور که در این شکل ملاحظه می شود، ولتاژ خطبه خط یک ولتاژ یازده سطحی می باشد و جریان فاز a به دلیل نوع بار و همچنین ولتاژ تولیدی، یک جریان سینوسی می باشد. همچنین با توجه به شکل ۱۷ دامنه جریان بار ۲ آمپر می باشد.

۸- نتیجه گیری

در این مقاله یک اینورتر چندسطحی سه فاز هیبریدی جدید ارائه شد. در این ساختار با افزایش تعداد سلول های کمی، تعداد سطوح ولتاژ هر شاخه و در نتیجه تعداد سطوح ولتاژ خطبه خط افزایش می یابد. این ساختار با ساختارهای مرسوم و ساختارهایی که اخیراً ارائه شده است، از نقطه نظر تعداد ادوات میدل از جمله IGBT، مدار راه انداز، تنش ولتاژ و تعداد منابع DC ورودی مقایسه گردید. با توجه به مقایسه های انجام گرفته مشخص گردید که اینورتر پیشنهادی برای تولید ولتاژ خطبه خط چندسطحی به تعداد کم IGBT و مدار راه انداز در مقایسه با ساختارهای دیگر نیاز دارد که موجب ساده شدن اینورتر و روش کنترلی آن می شود. همچنین این اینورتر از نقطه نظر تلفات نیز مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده گردید در شرایط یکسان، اینورتر پیشنهادی دارای تلفات کمتری نسبت به دیگر اینورترها است. در نهایت برای تأیید عملکرد ساختار پیشنهادی، شبیه سازی انجام گرفته و نمونه آزمایشگاهی اینورتر پیشنهادی ساخته شده و نتایج حاصل از آن ها عملکرد صحیح اینورتر پیشنهادی را تأیید نمودند.

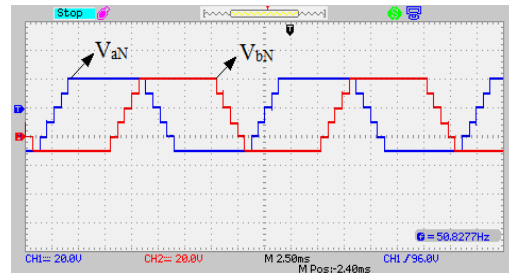
مراجع

[1] H. Abu-Rub, J. Holtz, J. Rodriguez and G. Baoming, "Medium-voltage multilevel converters—state of the art, challenges, and requirements in industrial applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 8, pp. 2581-2596, 2010.

جدول ۸: مقادیر استفاده شده در نمونه آزمایشگاهی

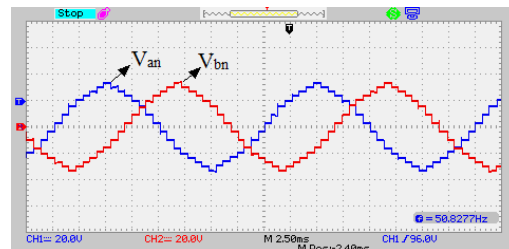
پارامتر	مقادیر
	سطحی ۱۱
$V_a = V_b = V_c$	۱۰ ولت
V_m	۳۰ ولت
R	۳ اهم
L	۴۸ میلی هانری

در شکل ۱۴ شکل موج حاصل از مدار آزمایشگاهی شاخه a (V_{aN}) و شاخه b (V_{bN}) نشان داده شده است.



شکل ۱۴: شکل موج ولتاژ شاخه a (V_{aN}) و شاخه b (V_{bN}) در نمونه آزمایشگاهی

همان طور که در شکل ۱۴ مشاهده می شود، شکل موج ولتاژ شاخه a و b شش سطحی می باشد که ولتاژ شاخه b ، 120° درجه نسبت به شاخه a اختلاف فاز دارد. با توجه به شکل ۱۴ بیشینه ولتاژ تولیدی هر شاخه ۴۰ ولت و کمینه ولتاژ تولیدی هر شاخه 10° ولت می باشد. در شکل ۱۵ شکل موج ولتاژ فاز a و b نشان داده شده است.



شکل ۱۵: شکل موج ولتاژ فاز a (V_{an}) و فاز b (V_{bn}) در نمونه آزمایشگاهی

همان طور که در شکل ۱۵ مشاهده می شود، شکل موج ولتاژ فاز b 120° درجه نسبت به ولتاژ فاز a اختلاف فاز دارد. در شکل ۱۶ شکل موج ولتاژ خطبه خط بین فاز a و b (V_{ab}) و فاز b و c (V_{bc}) نشان داده شده است.

همان طور که در شکل ۱۶ مشاهده می شود، ولتاژ خطبه خط بین فاز b و c (V_{bc}) نسبت به ولتاژ خطبه خط بین فاز a و b (V_{ab})، 120° درجه اختلاف فاز دارد. با توجه به شکل ۱۶ ولتاژ خطبه خط یک ولتاژ یازده سطحی می باشد که بیشینه ولتاژ آن ۵۰ ولت و کمینه ولتاژ آن 50° ولت می باشد. در شکل ۱۷ شکل موج ولتاژ خطبه خط V_{ab} و جریان فاز a نشان داده شده است.

- Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no.1, pp. 18–36, 2015.
- [17] S. Debnath, Q. Jiangchao, B. Bahrani, M. Saeedifard, and P. Barbosa, "Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: A review," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 1, pp. 37–53, 2015.
- [18] R. Karasani; V. B. Borghate; P. M. Meshram; H. M. Suryawanshi and S. Sabyasachi, "A Three Phase Hybrid cascaded Modular Multilevel Inverter for Renewable Energy Environment," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1.
- [19] S. K. Chattopadhyay, C. Chakraborty, and B. C. Pal, "A hybrid multilevel inverter topology with third harmonic injection for grid connected photovoltaic central inverters," *Proc. Int. Symp. Ind. Electron.*, pp. 1736–1741, 2012.
- [20] A. L. Batschauer, S. A. Mussa, and M. L. Heldwein, "Three-phase hybrid multilevel inverter based on half-bridge modules," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 2, pp. 668–678, 2012.
- [21] S. Kouro, *et al.*, "Recent advances and industrial applications of multilevel converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 8, pp. 2553-2580, 2010.
- [۲۲] سعید عباسی، علی اصغر قدیمی و امیرحسین ابوالمعصومی، «حذف نوسانات توان اکتیو تزریقی سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه در شرایط افت ولتاژ»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۲، صفحه ۱۴۹–۱۵۸، ۱۳۹۵.
- [23] N. Farokhnia, H. Vadizadeh, S. H. Fathi and F. Anvariasl, "Calculating the formula of line-voltage THD in multilevel inverter with unequal DC sources," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 8, pp. 3359-3372, 2011.
- [24] G. Waltrich, and I. Barbi, "Three-phase cascaded multilevel inverter using power cells with two inverter legs in series," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 8, pp. 2605-2612, 2010.
- [25] A. Salem, E. M. Ahmed, M. Orabi and M. Ahmed, "New three-phase symmetrical multilevel voltage source inverter," *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 430-442, 2015.
- [26] E. Najafi and A. H. M. Yatim, "Design and implementation of a new multilevel inverter topology," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 11, pp. 4148-4154, 2012.
- [27] Y. S. Lai, F. S. Shyu, "Topology for hybrid multilevel inverter," *IEE Proc. Eletec. Power Appl.*, Vol. 149, No.6, pp. 449–458, 2002.
- [28] M. FarhadiKangarlu; E. Babaei, "Cross-switched multilevel inverter: an innovative topology," *IET Power Electron.* vol. 6, no. 4, pp. 642–651, 2013.
- [29] P. Gaur and P. Singh, "Various control strategies for medium voltage high power multilevel converters: A review," *Engineering and Computational Sciences (RAECS)*, 2014 Recent Advances in, Chandigarh, pp. 1-6, 2014.
- [30] A. Mokhberdoran and A. Ajami, "Symmetric and asymmetric design and implementation of new cascaded multilevel inverter topology," *IEEE Transactions on Power Electronics*. vol. 29, no. 12, pp. 6712-6724, 2014.
- [31] E. Babaei, S. Alilu and S. Laali, "A new general topology for cascaded multilevel inverters with reduced number of components based on developed H-bridge," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 8, pp. 3932-3939, 2014.
- [2] S. Saeidabadi, S. H. Hosseini, K. Varesi and M. Sabahi, "A modified grid-connected current source inverter for photovoltaic application," *6th Power Electronics, Drives Systems & Technologies Conference (PEDSTC)*, Tehran, pp. 218-223, 2015.
- [3] A. A. Gandomi, S. Saeidabadi; S. H. Hosseini; E. Babaei, M. Sabahi, "Transformer-based inverter with reduced number of switches for renewable energy applications," *IET Power Electronics*, vol.8, no.10, pp.1875-1884, 2015.
- [4] J. Rodriguez, S. Bernet, P. K. Steimer, and I. E. Lizama, "A survey on neutral-point-clamped inverters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 7, pp. 2219–2230, 2010.
- [5] T. A. Meynard, and H. Foch, "Multi-level conversion: high voltage choppers and voltage-source inverters," *Power Electronics Specialists Conference*, 1992. PESC '92 Record., 23rd Annual IEEE, vol., no., pp.397-403 vol.1, 1992.
- [6] J. Rodriguez, S. Bernet, B. Wu, J. O. Pontt and S. Kouro, "Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 6, pp. 2930-2945, 2007.
- [۷] سیما شاه‌محمدی، سیدحسین حسینی، ابراهیم بابایی، مهران صباحی و جابر فلاح اردشیر، «آنالیز تحلیلی هارمونیک‌های خروجی اینورترهای چندسطحی در حالت کلیدزنی نامتقارن»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۱، صفحه ۲۰۹–۲۱۹، ۱۳۹۵.
- [8] Z. Pan and F. Z. Peng, "A sinusoidal PWM method with voltage balancing capability for diode-clamped five-level converters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, no. 3, pp. 1028-1034, 2009.
- [9] A. Ashraf Gandomi, K. Varesi and S. H. Hosseini, "Control strategy applied on double flying capacitor multi-cell inverter for increasing number of generated voltage levels," *IET Power Electronics*, vol. 8, no. 6, pp. 887-897, 2015.
- [10] K. M. Tsang and W. L. Chan, "Single DC source three-phase multilevel inverter using reduced number of switches," *IET Power Electronics*, vol. 7, no. 4, pp. 775-783, 2014.
- [11] H. Belkamel, S. Mekhilef, A. Masaoud, and M. A. Naeim, "Novel three-phase asymmetrical cascaded multilevel voltage source inverter," *IET Power Electronics*, vol. 6, no. 8, pp. 1696–1706, 2013.
- [12] R. Naderi, A. K. Sadigh and K. M. Smedley, "Dual flying capacitor active-neutral-point-clamped multilevel converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 9, pp. 6476-6484, 2016.
- [13] V. Dargahi, A. K. Sadigh, M. Abarzadeh, S. Eskandari, and K. A. Corzine, "A new family of modular multilevel converter based on modified flying-capacitor multicell converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 1, pp. 138–147, 2015.
- [14] C. I. Odeh, V. N. Agu and N. Goshwe, "Cascaded three-phase pulse-width modulated switched voltage source inverter," *IET Power Electronics*, vol. 7, no. 7, pp. 1925-1933, 2014.
- [15] E. C. D. Santos, J. H. G. Muniz, E. R. C. d. Silva, and C. B. Jacobina, "Nested multilevel topologies," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 8, pp. 4058–4068, 2015.
- [16] A. Nami, J. Liang, F. Dijkhuizen, and G. D. Demetriades, "Modular multilevel converters for HVDC applications: Review on converter cells and functionalities," *IEEE*