

ارائه یک اینورتر فتوولتاییک تک فاز بدون ترانسفورماتور نوین به منظور حذف جریان نشتی Common Mode

مهرداد محمودیان^۱، محسن گیتی زاده^۲، امیرحسین رجایی^۳

^۱دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی شیراز، m.mahmoudian@sutech.ac.ir

^۲دانشیار، دانشگاه صنعتی شیراز

^۳دانشیار، دانشگاه صنعتی شیراز

چکیده

این مقاله یک توپولوژی نوین را برای حذف جریان نشتی حالت مشترک در اینورترهای متصل به شبکه ارائه می‌کند. به منظور حذف جریان نشتی در اینورترهای فتوولتاییک متصل به شبکه، تاکنون توپولوژی‌های بسیاری معرفی شده‌اند. اما هیچ کدام دارای بازده بالای ۹۸ درصد نبوده‌اند. در این مقاله یک اینورتر نوین ارائه می‌گردد که ضمن حذف جریان نشتی، بازدهی را بالا می‌برد و از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشد. زیرا این ساختار از ۶ کلید و دو دیود تشکیل شده که در مقایسه با موارد مشابه، از تعداد المان‌های کمتری برخوردار است. در این اینورتر تلفات توان نسبت به توپولوژی‌های معروف مانند $dH5$ ، $H6$ و $HERIC$ کمتر بوده و استرس ولتاژ سوئیچ‌ها کاهش می‌یابد. این ویژگی‌ها به دلیل ترکیب بندی منحصر به فرد ساق‌های اینورتر و مکان قرارگیری کلیدها و دیودها و تشکیل مسیر هرزگرد مناسب پدید می‌آیند. مسیر هرزگرد، قسمت AC را از سمت DC دکوپله می‌کند و باعث قطع شارش جریان نشتی از آرایه فتوولتاییک به شبکه AC می‌گردد. این موضوع باعث بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه و حفظ استانداردهای حفاظتی خواهد شد. در انتها با مقایسه اینورتر پیشنهادی با گونه‌های موجود، صحت این مطالب اعتبار سنجی می‌گردد.

کلیدواژه

اینورترهای متصل به شبکه، جریان نشتی حالت مشترک، فتوولتاییک.

مقدمه

شده است [۱-۳]. با توجه به قوانین بازار سالانه فتوولتاییک کل، که از سوی انجمن صنعت فتوولتاییک اروپا (EPIA) منتشر شده است، بازار جهانی PV در سال ۲۰۱۲ تقریباً ۳۱ تبادلی انرژی داشته است که این میزان چهار برابر سال ۲۰۰۸ می‌باشد. پیش‌بینی می‌شود اگر بازار PV به عنوان بازار محرک سیاست‌گذاری باقی بماند، این میزان به ۸۴ GW می‌رسد. در اروپا، بخش مسکونی با سیستم‌های PV توزیع، با نرخ ۲۱٪ رشد کرده‌اند و پیش‌بینی می‌شود که در سال‌های نزدیک، با سرعت بیشتری در حال افزایش باشد [۴].

اینورترهای متصل به شبکه واسط‌های مهمی میان پنل‌های PV و شبکه توزیع هستند که عموماً به سیستم ایزوله (بدون اتصال گالوانیکی) و سیستم غیر ایزوله (با اتصال گالوانیکی)

اینورترهای تک‌فاز منبع ولتاژ بدون ترانسفورماتور^۱ از سال‌ها پیش در صنعت حضور یافته و کاربردهای موفقیت آمیزی در سیستم‌های فتوولتاییک متصل به شبکه داشته‌اند. بسیاری از مدل‌های پیشرفته صنعتی و ابداعات جدید، تنها در طی چند سال اخیر به منتشر و بازار معرفی شده‌اند.

منابع فتوولتاییک به دلیل قابل اعتماد بودن^۲، تمیز بودن^۳ و عاری بودن از انتشار گازهای آلوده کننده هوا^۴، به عنوان یکی از بهترین و نوید بخش ترین منابع انرژی تجدید شونده پذیرفته

^۱Single Phase Voltage Source Transformer-less Inverters

^۲Photovoltaic

^۳Reliable

^۴Clean

^۵Emission-free

^۶European Photovoltaic Industry Association

^۷Grid-Connected Inverters

کنترل فرکانس شبکه و کنترل توان‌های تولیدی اکتیو و راکتیو در استاندارد نام‌برده انتشار یافته و به طور جامع مورد توجه قرار گرفته است.

با توجه به مسائل و بررسی‌های فوق، مشکلات و نگرانی‌های اصلی در اینورتر فتوولتاییک بدون ترانسفورماتور می‌تواند در سه بعد زیر خلاصه شود:

۱. راندمان: بازدهی بالا، مهم‌ترین شاخص بررسی عملکرد سیستم PV است. بازده کلی بسیار بالا برای سیستم‌های توزیعی PV، ۷۷٪/۷۹٪ از طریق Steca's stecaGrid ۳۶۰۰ تولید شده است [۱۳]. این موضوع با فناوری تأمین توان Steca's stecaGrid ۳۶۰۰ به ۹۶٪/۹۷٪ می‌رسد [۱۴].

۲. قابلیت اطمینان: میانگین زمان بین خطاها (MTBF) و میانگین زمان رخداد اولین خطا (MTTF) دو پارامتر مهم برای بررسی قابلیت اعتماد سیستم است [۱۷-۱۵]. الزام وجود طرح بهینه سنجش قابلیت اطمینان برای اینورترهای PV، نه تنها می‌تواند رضایت مشتری و اعتبار برند را افزایش دهد، بلکه از هزینه‌های حفاظت نیز می‌کاهد. به علاوه، استانداردهای به‌روز شده‌ی شبکه PV برای قابلیت اطمینان اینورترهای PV استفاده می‌شوند تا پایداری شبکه مورد حفظ گردد.

۳. هزینه: گزارش‌های انتشار یافته توسط دپارتمان انرژی^{۱۰} (DOE) ایالات متحده آمریکا، نشان می‌دهند که قیمت-های مصوب برای سیستم‌های PV مسکونی با توان پایین ($\leq 10 \text{ kw}$) در سال ۲۰۰۹ از ۸ دلار بر وات به ۴/۸ دلار بر وات در سال ۲۰۱۳ کاهش یافته است. این موضوع همچنین حاکی از آن است که اینورترهای PV ۱۰ تا ۲۰ درصد هزینه اولیه را به خود اختصاص می‌دهند [۱۸]. کاهش قیمت برای اینورترهای PV، بدون شک می‌تواند رقابت پذیری تولید PV را برای سرمایه‌گذاران و تولیدکننده‌ها افزایش دهد.

به‌جز مسائل فوق‌الذکر، ساختار سیستم و مدل آن، تنظیم نقطه استخراج حداکثر توان (MPPT)، کنترل توان اکتیو یا راکتیو، ترانس خطای سیستم [۱۹] و ...، توجه زیادی را به خود معطوف ساخته‌اند.

با وجود اینکه درک کاملی از سیستم‌های اینورتر PV متصل به شبکه، بررسی کلی مدل‌ها و کنترل اینورتر تک فاز متصل به شبکه در چندین مرجع صورت پذیرفته است [۲۰]، اما حذف جریان نشتی موجود در سیستم‌های بدون ترانسفورمر PV به خوبی مورد ارزیابی قرار نگرفته‌اند.

تقسیم بندی می‌گردند. ترانسفورماتورهای فرکانس بالای کم حجم در سمت بخش DC یا ترانسفورماتورهای حجیم فرکانس پایین در سمت قسمت AC شبکه، معمولاً به عنوان ابزاری برای حذف اتصال گالوانیک و پدید آوردن ایزولاسیون قسمت DC از بخش AC مورد استفاده قرار می‌گیرند. این عمل می‌تواند ایمنی سیستم را بهبود بخشد؛ اما متأسفانه، راندمان کلی مدار به واسطه تلفات زیاد ترانسفورماتورها و دیگر المان‌های سیستم، کاهش می‌یابد. در صورتی که ترانسفورماتور حذف گردد، سیستم بدون ترانسفورماتور یا غیر ایزوله می‌تواند بازده را تا حد قابل قبولی نسبت به حالت ایزوله، افزایش دهد [۵]. به علاوه، هزینه ساخت سیستم با حذف ترانسفورماتورها و دیگر المان‌های مربوطه مانند سنسورهای ایزولاسیون کاهش می‌یابد [۸-۶]. همچنین، به منظور افزایش رقابت پذیری و پدید آمدن بازار مناسب در سیستم‌های توزیع PV، برخی تولیدکنندگان این محصول، بیش از ۲۰ سال گارانتی برای سیستم‌های PV اعلام کرده‌اند. اما شایان ذکر است که متأسفانه متوسط طول عمر اینورترهای PV متصل به شبکه در حدود ۵ سال برآورد می‌گردد [۹]. در نتیجه، به منظور رعایت تعهد ضمانت سیستم‌های فتوولتاییک، جایگزین سازی اینورترها بین سه تا پنج بار در طول مدت گارانتی، امری ضروری به نظر می‌رسد. به هر تقدیر، این عملکرد بار زیادی بر سرمایه‌گذاری‌های سیستم تحمیل می‌نماید. اینورترهای فتوولتاییک متصل به شبکه باید مطابق با استانداردهای شبکه و قوانین حاکم بر آن مورد استفاده قرار بگیرند؛ به‌گونه‌ای که با معیارهای حفاظتی سیستم و بهره‌برداری مطابقت داشته باشند [۱۱-۱۰]. مشخصات الکتریکی مدارها مانند حفاظت و شناسایی جریان نشتی، نظارت و حفاظت بر فرکانس شبکه، کنترل توان اکتیو و راکتیو و کیفیت توان از جمله این فاکتورها به حساب می‌آیند. بدین منظور سخت‌ترین و دقیق‌ترین استانداردها برای سیستم‌های PV اعلام می‌گردد تا آن‌ها، ایمنی و ملزومات مربوط به قابلیت اطمینان سیستم را تأمین نمایند.

اگر اتصالات الکتریکی میان پنل‌های PV و شبکه قدرت توزیع در سیستم‌های بدون ترانسفورماتور متصل به شبکه به درستی قرار گرفته باشند، جریان نشتی ایجاد شده از طریق خازن‌های پارازیتی PV را می‌توان به دقت کنترل نمود. جریان نشتی بیشتر از ۳۰۰ mA، ظرف مدت ۰/۳ ثانیه در استاندارد ۱-۱-۱۲۶ VDE بنا به مسائل حفاظتی، باید قطع گردد. با توجه به تبدیل توان در سیستم‌های DC به AC، جریان‌های نشتی ناگهانی ظرف مدت زمان ویژه‌ای که در مرجع [۱۲] فهرست شده‌اند باید حتماً قطع شوند. کاربرد ابزارهای حفاظت جریان نشتی در استاندارد آلمانی به VDE-AR-N 4105، شرح داده شده است. برای افزایش پایداری و قابلیت اطمینان شبکه،

^{۱۰} Mean Time Between Failures
^{۱۱} Mean Time to First Failure
^{۱۲} Department of Energy
^{۱۳} Maximum Power Point Tracking

V_{PV} : منبع ولتاژ dc آرایه فتوولتاییک

C_{dc} : ظرفیت خازنی آرایه فتوولتاییک

L_A و L_B : سلف فیلتر خروجی

C_{out} : ظرفیت خازنی قسمت AC

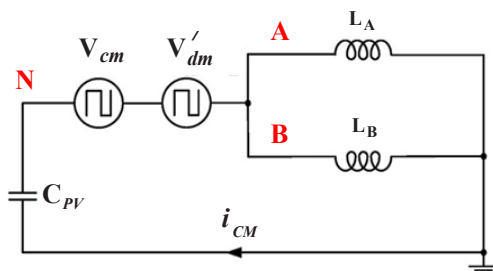
Z_{ground} : امپدانس زمین و مسیر شارش جریان ناشی

ولتاژ حالت مشترک یا V_{cm} میانگین ولتاژ نقاط A و B تا نقطه N در مدار می‌باشد. همچنین، ولتاژ V_{dm} دیفرانسیل ولتاژ نقاط مذکور است. شکل (۲) مدار معادل این شبکه را برای محاسبه ولتاژ حالت مشترک نهایی به تصویر کشیده است. بنابراین طبق شکل، می‌توان این چنین تعریف نمود:

$$V_{cm} = \frac{V_{AN} + V_{BN}}{2} \quad (1)$$

$$V'_{dm} = \frac{V_{dm}}{2} \frac{(L_B - L_A)}{(L_B + L_A)} \quad (2)$$

$$V_{dm} = V_{AN} - V_{BN} \quad (3)$$



شکل ۲. مدار معادل ساده شده برای محاسبه جریان ناشی

از آنجایی که i_{cm} (ناشی از ولتاژ نهایی حالت مشترک) در حلقه مذکور شارش پیدا می‌کند، می‌توان ولتاژ حالت مشترک را با در نظر گرفتن تأثیرات سلف‌های فیلتر، این چنین بیان نمود:

$$V_{t,cm} = V_{cm} + \frac{V_{dm}}{2} \frac{(L_B - L_A)}{(L_B + L_A)} \quad (4)$$

$$= \frac{V_{AN} + V_{BN}}{2} + \frac{V_{AN} - V_{BN}}{2} \frac{(L_B - L_A)}{(L_B + L_A)}$$

واضح است که شرط حذف جریان ناشی حالت مشترک، ثابت نگه‌داشتن ولتاژ $V_{t,cm}$ خواهد بود. لذا می‌توان نوشت:

$$V_{t,cm} = \frac{V_{AN} + V_{BN}}{2} + \frac{V_{AN} - V_{BN}}{2} \frac{(L_B - L_A)}{(L_B + L_A)} \quad (5)$$

$$= cte$$

در برخی اینورترها مانند اینورترهای خانواده نیم پل یا باک دوگانه و ... (شکل‌های ۳ تا ۶) [۲۴-۲۱]، تنها یک سلف فیلتر استفاده شده است و سلف دیگر صفر است. اگر فرض کنید $L_A=0$ رابطه (۶) به دست می‌آید.

$$L_A = 0 \rightarrow V_{t,cm} = \frac{V_{AN} + V_{BN}}{2} \quad (6)$$

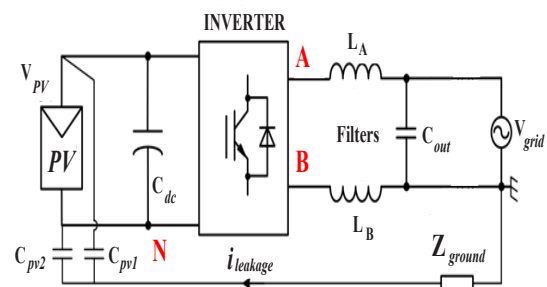
$$+ \frac{V_{AN} - V_{BN}}{2} \frac{(L_B)}{(L_B)} = V_{AN} = cte$$

در این مقاله ابتدا مکانیزم تولید و حذف جریان ناشی حالت مشترک مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس با مروری بر اینورترهای موجود، مزایا و معایب آن‌ها شرح داده خواهد شد. در انتها با ارائه مبدل پیشنهادی مبتنی بر اینورتر با سلف متقارن، یک ساختار بهینه پیشنهاد می‌گردد که در مقایسه با موارد موجود و مشابه، دارای تلفات توان اکتیو کمتر و راندمان بالاتری می‌باشد. در نهایت اعتبار سنجی اینورتر پیشنهادی و مقایسه آن با اینورترهای موجود، صحت این ادعا را ثابت می‌نماید.

مکانیزم حذف جریان ناشی Common Mode

معمولاً در اتصال آرایه‌های فتوولتاییک به شبکه برق AC دو نمونه اتصال مورد توجه است. (۱) اتصال قسمت DC به AC با استفاده از ترانسفورماتور؛ (۲) اتصال قسمت DC به AC بدون استفاده از ترانسفورماتور و با توجه به اتصالات گالوانی. در حالت اول تاکنون توپولوژی‌های بسیاری ارائه شده‌اند اما به دلیل قیمت بالای ترانسفورماتور، معمولاً استفاده از اینورترهای سویچینگ در کاربردهای توان پایین ارجحیت دارد. در اینورترهای دسته دوم که به اینورترهای سویچینگ معروف‌اند، یک اتصال گالوانی بین قسمت DC و AC برقرار می‌گردد که موجب پدید آمدن «جریان ناشی حالت مشترک» خواهد شد.

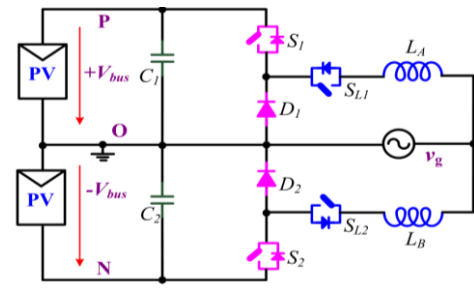
مدار معادل ساده‌شده‌ای از مسیر شارش این جریان در اینورترهای بدون ترانسفورماتور در شکل (۱) دیده می‌شود. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، جریان حالت مشترک از طریق حلقه‌ای شامل منبع ولتاژ DC، کلیدهای اینورتر، سلف فیلتر، شبکه AC، امپدانس زمین و خازن پارازیتی C_{pv} در مدار شارش می‌کند.



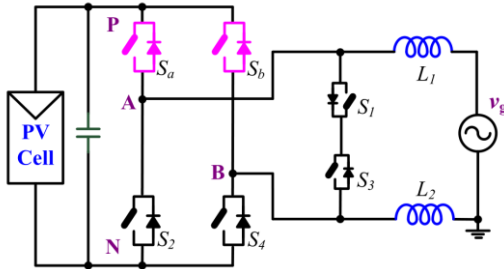
شکل ۱. مدار معادل یک اینورتر تکفاز متصل به شبکه و مسیر بسته شدن جریان ناشی

در شکل (۱) المان‌ها عبارت‌اند از :

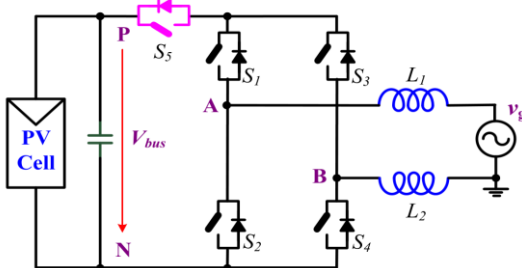
C_{PV} : خازن پارازیتی بین آرایه فتوولتاییک و زمین مدار



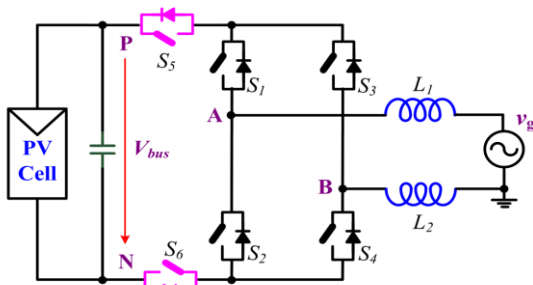
شکل ۶. ساختار باک دوگانه سری



شکل ۷. ساختار HERIC



شکل ۸. ساختار H5



شکل ۹. ساختار H6

ساختار اینورتر پیشنهادی

مدار اینورتر پیشنهادی، ترکیبی از خانواده اینورترهای H6 و اینورترهای سلف متقارن است. در واقع این اینورتر در چهار ساق طراحی شده که می‌تواند با دو سلف در فیلتر خروجی خود، یک ولتاژ سینوسی با THD بسیار پایین تولید نماید. شکل اینورتر پیشنهادی در تصویر (۱۰) نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌نمایید، این اینورتر از ۶ کلید و دو دیود تشکیل شده است که چهار کلید (از شماره ۱ تا ۴) در فرکانس بالا و کلیدهای ۵ و ۶ به همراه دیودهای سری با آنها

و اگر $L_B=0$ گردد، فرمول (۷) استخراج خواهد شد.

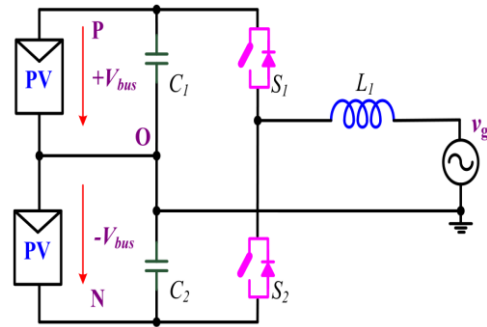
$$L_B = 0 \rightarrow V_{t,cm} = \frac{V_{AN} + V_{BN}}{2} \quad (7)$$

$$+ \frac{V_{AN} - V_{BN}}{2} \frac{(-L_A)}{(+L_A)} = V_{BN} = cte$$

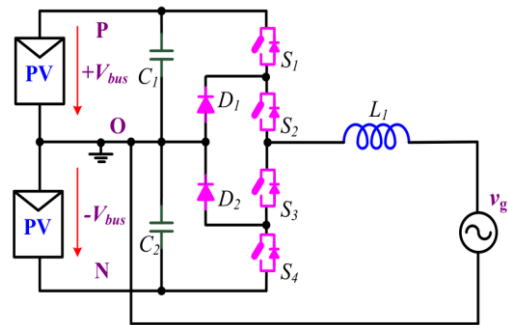
در نمونه‌های دیگر اینورترهای بدون ترانسفورماتور مانند مراجع [۲۷-۲۵] نشان داده شده در شکل‌های (۷) تا (۹)، هر دو سلف L_A و L_B موجود و معمولاً برابر می‌باشد. تساوی این دو سلف نتیجه می‌دهد که $V_{dm}=0$. لذا می‌توان شرط حذف جریان نشتی را این‌گونه برآورد نمود:

$$L_A = L_B \rightarrow V_{t,cm} = \frac{V_{AN} + V_{BN}}{2} = cte \quad (8)$$

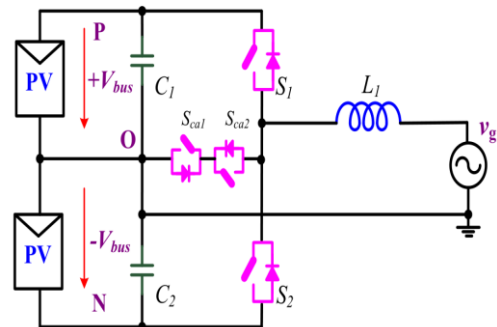
در نتیجه، VSI های بدون ترانسفورماتور می‌توانند به گروه مبتنی بر سلف نامتقارن و گروه مبتنی بر سلف متقارن تقسیم بندی گردد.



شکل ۳. اینورتر دو سطحی نیم پل

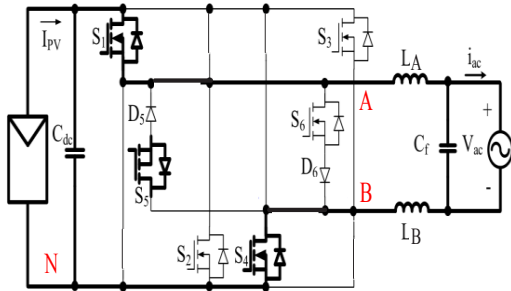


شکل ۴. اینورتر سه سطحی NPC



شکل ۵. اینورتر سه سطحی نوع T

$$V_{t,cm} = \frac{V_{AN} + V_{BN}}{2} + \frac{V_{AN} - V_{BN}}{2} \frac{(0)}{(L_B + L_A)} = \frac{V_{dc} + 0}{2} = \frac{V_{dc}}{2} = cte \quad (9)$$

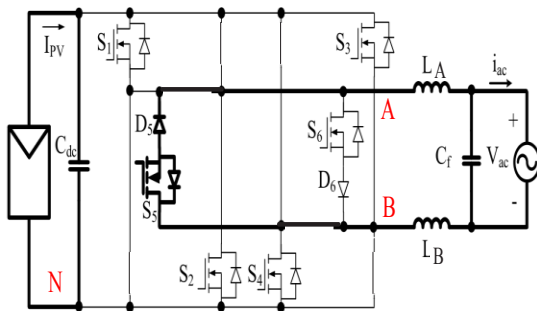


شکل ۱۲. ساختار اینورتر پیشنهادی در حالت اول

حالت دوم (Mode 2)

در این حالت، هنوز کلیدهای ۲ و ۳ و ۶ خاموش‌اند. اما کلید ۱ و ۴ نیز در مدت زمان کوتاهی (مدت زمان Mode 2 نشان داده شده در شکل (۱۱)) خاموش می‌گردند. این لحظه، زمان هرزگرد است. لذا قسمت DC از قسمت AC دکوپل شده و راهی برای شارش جریان نشستی حالت مشترک باقی نمی‌گذارد. لذا جریان نشستی حالت مشترک حذف می‌گردد. پس با توجه به توپولوژی مدار می‌توان بیان نمود که $V_{AN}=V_{BN}$ است. در نتیجه می‌توان نوشت:

$$V_{t,cm} = \frac{V_{AN} + V_{BN}}{2} + \frac{V_{AN} - V_{BN}}{2} \frac{(0)}{(L_B + L_A)} = \frac{\frac{V_{dc}}{2} + \frac{V_{dc}}{2}}{2} = \frac{V_{dc}}{2} = cte \quad (10)$$

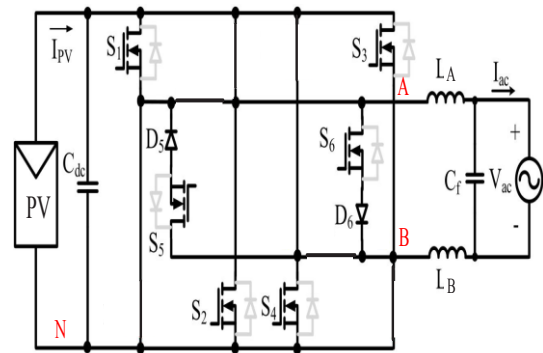


شکل ۱۳. ساختار اینورتر پیشنهادی در حالت دوم

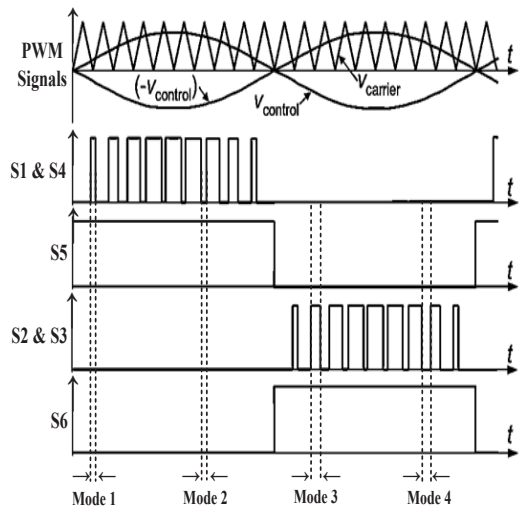
حالت سوم (Mode 3)

در این حالت، کلیدهای ۲ و ۳ و ۶ خاموش‌اند، کلید ۵ در فرکانس ۵۰ هرتز کار می‌کند و پالس SPWM به کلیدهای ۱ و ۴ اعمال می‌گردد. در این مود در ابتدا فرض می‌شود که کلیدهای ۱ و ۴ روشن هستند. لذا ولتاژ V_{dc} رو سر دیود ۵ می‌افتد و دیود هدایت نمی‌کند. در نتیجه جریان از طریق کلیدهای ۱ و ۴، از قسمت DC به قسمت AC شارش می‌کند. در این حالت $V_{AN}=V_{dc}$ و $V_{BN}=0$ هستند. لذا می‌توان نوشت:

در فرکانس پایین کار می‌کنند. الگوریتم سویچینگ آن نیز در شکل (۱۱) به تصویر کشیده شده است. لازم به ذکر است که هیچ کدام از دیودهای موازی سویچ‌ها، در هیچ بازه زمانی هدایت نمی‌کنند.



شکل ۱۰. ساختار اینورتر پیشنهادی



شکل ۱۱. الگوی سویچینگ اینورتر پیشنهادی

این اینورتر در چهار حالت بهره‌برداری می‌شود تا جریان نشستی حذف گردد. در ذیل، این چهار حالت به تفصیل بیان خواهند شد.

حالت اول (Mode 1)

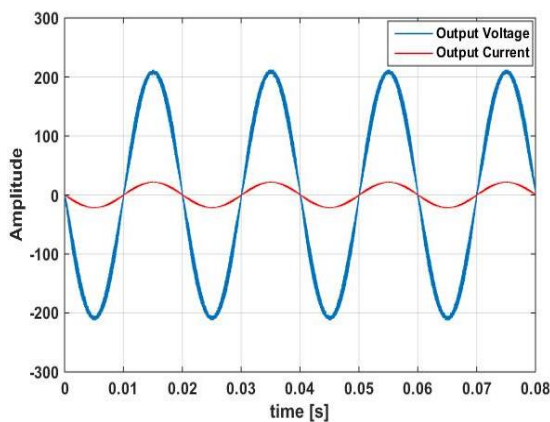
در این حالت، کلیدهای ۲ و ۳ و ۶ خاموش‌اند، کلید ۵ در فرکانس ۵۰ هرتز کار می‌کند و پالس SPWM به کلیدهای ۱ و ۴ اعمال می‌گردد. در این مود در ابتدا فرض می‌شود که کلیدهای ۱ و ۴ روشن هستند. لذا ولتاژ V_{dc} رو سر دیود ۵ می‌افتد و دیود هدایت نمی‌کند. در نتیجه جریان از طریق کلیدهای ۱ و ۴، از قسمت DC به قسمت AC شارش می‌کند. در این حالت $V_{AN}=V_{dc}$ و $V_{BN}=0$ هستند. لذا می‌توان نوشت:

ثابت است و این موضوع نشان دهنده حذف جریان نشتی می-باشد.

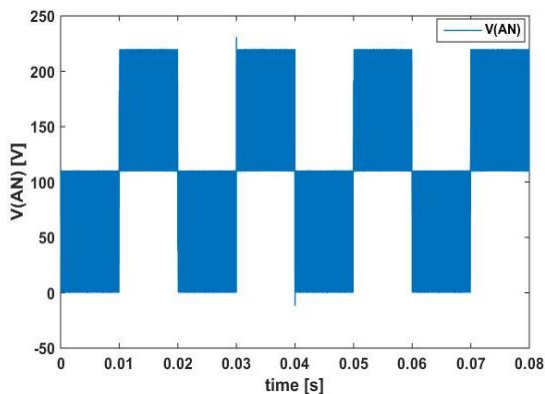
جدول ۱. مقادیر اینورتر تحت آزمایش

مقدار	المان
۲۲۰ V	ولتاژ ورودی
۳۰۰۰ W	بار خروجی
۳۰ kHz	فرکانس کلید زنی
۵۰ Hz	فرکانس خط
۱ mH	هر دو سلف فیلتر
۰/۰۱ Ohm	مقاومت زمان روشن شدن کلید
۰/۸ V	ولتاژ فرورارد دیود

به علاوه نمودار جریان نشتی گذرنده از مدار نیز در شکل (۲۰) به تصویر کشیده شده است. این مقدار طبق استاندارد آلمانی VDE 0126-1-1 زیر ۳۰ میلی آمپر است و نشان دهنده طراحی مناسب اینورتر پیشنهادی می‌باشد. همان‌گونه که انتظار می‌رود، ولتاژ V_{AB} همواره ثابت و برابر نصف ولتاژ ورودی DC می‌باشد. همچنین در آنالیز FFT شکل موج ولتاژ و جریان حاصل، می‌توان به THD برابر با ۱/۵ درصد اشاره نمود.



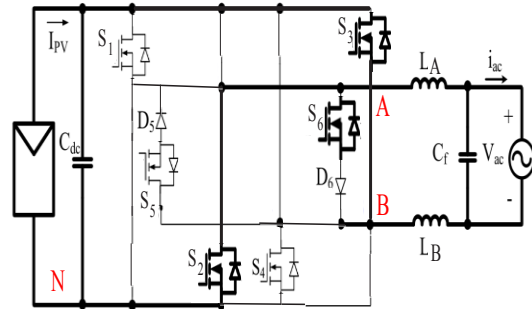
شکل ۱۶. ولتاژ و جریان خروجی



شکل ۱۷. ولتاژ V_{AN}

بی‌تأثیر خواهد بود. حال جریان از طریق کلیدهای ۲ و ۳ به سمت قسمت AC مدار شارژ پیدا می‌کند. در این حالت $V_{AN}=0$ و $V_{BN}=V_{dc}$ بنابراین خواهیم داشت:

$$V_{t,cm} = \frac{V_{AN} + V_{BN}}{2} + \frac{V_{AN} - V_{BN}}{2} \frac{(0)}{(L_B + L_A)} = \frac{0 + V_{dc}}{2} = \frac{V_{dc}}{2} = cte \quad (11)$$

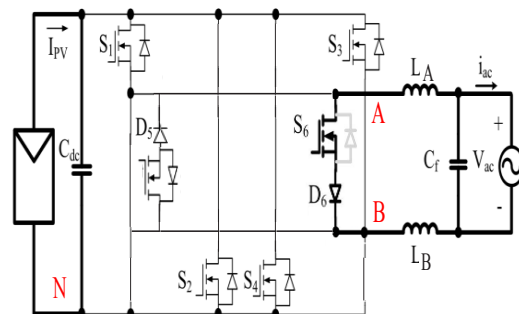


شکل ۱۴. ساختار اینورتر پیشنهادی در حالت سوم

حالت چهارم (Mode 4)

در این حالت، کلیدهای ۲ و ۳ خاموش می‌شوند. جریان شبکه AC در مسیر هرزگردی شامل کلید ۶ و دیود ۶ بسته می‌شود. لذا دوباره قسمت AC از سمت DC دکوپله می‌گردد و مسیر شارژ جریان نشتی حالت مشترک قطع می‌گردد. بنابراین روابط $V_{AN}=V_{dc}/2$ و $V_{BN}=V_{dc}/2$ صادق می‌باشند. پس داریم:

$$V_{t,cm} = \frac{V_{AN} + V_{BN}}{2} + \frac{V_{AN} - V_{BN}}{2} \frac{(0)}{(L_B + L_A)} = \frac{\frac{V_{dc}}{2} + \frac{V_{dc}}{2}}{2} = \frac{V_{dc}}{2} = cte \quad (12)$$



شکل ۱۵. ساختار اینورتر پیشنهادی در حالت چهارم

شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

مشخصات المان‌های اینورتر در جدول (۱) آورده شده است. نمودار شکل (۱۶)، ولتاژ و جریان خروجی اینورتر را برای تأمین بار ۳ کیلوواتی نشان می‌دهد. همچنین نمودار شکل‌های (۱۷) تا (۱۹) نیز، به ترتیب ولتاژ V_{AN} و V_{BN} و V_{AB} را نشان می‌دهند. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، این ولتاژ یک مقدار

$$V_{CE} = V_t + i(t)R_{CE} \quad (15)$$

که در آن افت ولتاژ کلید و R_{CE} مقاومت کلکتور امیتر آن است. اکنون می‌توان تلفات مدار را محاسبه کرد.

تلفات کلید IGBT

تلفات کلید IGBT در طول دوره هدایت برابر است با:

$$P1 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} i(t) \cdot V_{CE} \cdot T(t) d(\omega t) \quad (16)$$

$$= \frac{I_M V_t M}{4} + \frac{I_M^2 R_{CE} M}{1.5\pi}$$

در زمان خاموشی کلید، چون دیود موازی آن هدایت نمی‌کند، پس تلفاتی دیود موازی وجود ندارد.

تلفات دیود

تلفات هدایتی دیود برابر است با:

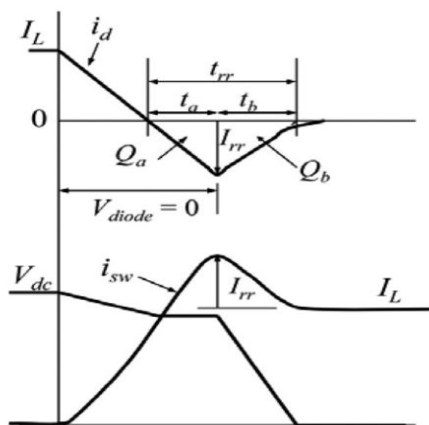
$$P2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} i(t) \cdot (V_f + i(t)R_{ak}) \cdot T'(t) d(\omega t) \quad (17)$$

$$= I_M V_f \left(\frac{1}{\pi} - \frac{M}{4}\right) + I_M^2 R_{ak} \left(\frac{1}{4} - \frac{M}{1.5\pi}\right)$$

همچنین تلفات دیود در حالت موازی معکوس برابر خواهد بود با:

$$P3 = \left(\frac{I_m t_a}{\pi} + \frac{I_{rr}(2t_a + t_b)}{8}\right) V_{dc} f_{sw} \quad (18)$$

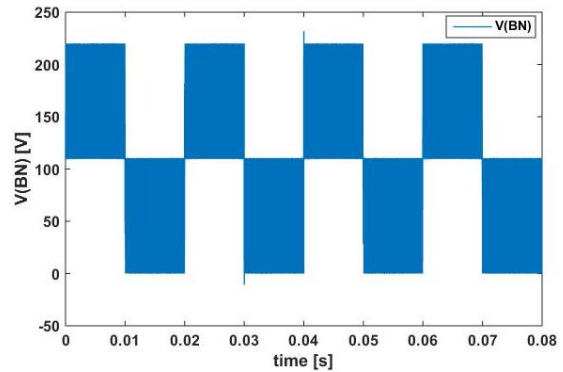
که در رابطه فوق، پارامترها از مشخصه سویچینگ دیود و طبق شکل (۲۱) تعیین می‌شوند.



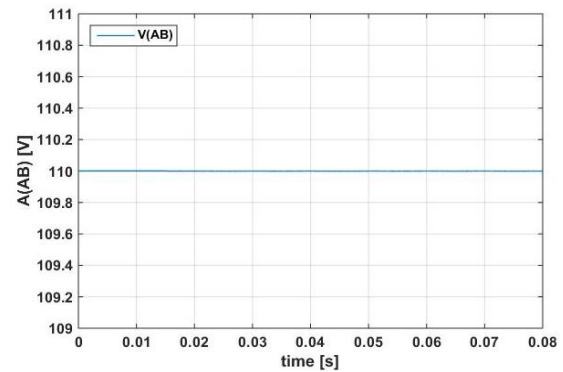
شکل ۲۱. مشخصه سویچینگ دیود

همچنین توان تلفاتی لحظه‌ی سویچینگ دیود طبق رابطه (۱۹) محاسبه می‌گردد.

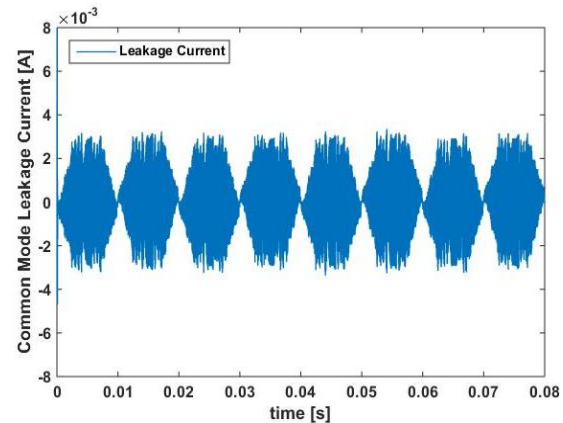
$$P4 = \frac{1}{4} I_{rr} t_b V_{dc} f_{sw} \quad (19)$$



شکل ۱۸. ولتاژ V_{BN}



شکل ۱۹. ولتاژ V_{AB}



شکل ۲۰. ولتاژ V_{AB}

محاسبه تلفات مدار

در محاسبه تلفات مدار، اگر جریان بار طبق رابطه (۱۳) بیان شود، می‌توان مدت زمان هدایت را با $T(t)$ و مدت زمان خاموش بودن عنصر را با $T'(t)$ نشان داد. پس داریم:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t) \quad (13)$$

$$T(t) = M \sin(\omega t) \quad \& \quad T'(t) = 1 - T(t) \quad (14)$$

همچنین می‌توان میزان افت ولتاژ کلید IGBT را طبق رابطه (۱۵) بیان نمود:

نتیجه گیری

به منظور افزایش بازده در اینورترهای تکفاز فتوولتاییک متصل به شبکه، باید تعداد المان‌های فعالی (کلید و دیود) که در مسیر شارش جریان قرار می‌گیرند، به حداقل برسد. این موضوع به وضوح در توپولوژی ارائه شده مورد توجه قرار گرفته است. میزان تلفات کمتر، قابلیت اطمینان بالا و راندمان چشمگیر در این ساختار نسبت به موارد مشابه موجود، از ویژگی‌های دیگر اینورتر فتوولتاییک پیش رو می‌باشد. نظر به اینکه جریان نشتی حالت مشترک باید در کاربردهای متصل به شبکه حذف گردد، لذا در این مقاله با بیان یک الگوی کلید زنی منحصر به فرد، شرایط تشکیل مسیر هرزگرد مهیا می‌شود. این مسیر هرزگرد با دکوپله کردن قسمت AC از سمت ولتاژ DC باعث قطع مسیر شارش جریان نشتی شده و لذا ولتاژ حالت مشترک ثابت خواهد شد. در این صورت جریان نشتی عملاً به صفر می‌گراید. راندمان بالای ۹۸ درصد در این توپولوژی در فرکانس‌های سویچینگ متفاوت، دلیلی دیگر بر بهینه بودن این ساختار خواهد بود.

مراجع

- [1] E. Romero-Cadaval, G. Spagnuolo, L. Garcia Franquelo, C. A. Ramos-Paja, T. Suntio, W. M. Xiao, "Grid-Connected Photovoltaic Generation Plants: Components and Operation," IEEE Transactions on Industrial Electronic, vol. 7, no.3, pp. 6-20, Sep. 2013.
- [2] Y. Gu, X. Xin, W. Li, X. He, "Mode-Adaptive Decentralized Control for Renewable DC Microgrid With Enhanced Reliability and Flexibility," IEEE Transactions on Power Electronic, vol. 29, no.9, pp. 5072 - 5080, Sep. 2014.
- [3] E. S. Sreeraj, K. Chatterjee and S. Bandyopadhyay, "One-Cycle-Controlled Single-Stage Single-Phase Voltage-Sensorless Grid-Connected PV System," IEEE Transactions on Industrial Electronic, vol. 60, no. 3, pp. 1216-1224, Mar. 2013.
- [4] "Global Market Outlook for Photovoltaics 2013-2017," European Photovoltaic Industry Association, 2013.
- [5] "Efficiencies by class in market survey," Photon International 4-2012, p. 148, 2012.
- [6] F. Bradaschia, M.C. Cavalcanti, P.E.P. Ferraz, F.A.S. Neves, E.C. dos Santos and J.H.G.Mda Silva, "Modulation for Three-Phase Transformerless Z-Source Inverter to Reduce Leakage Currents in Photovoltaic Systems," IEEE Transactions on Industrial Electronic, vol. 58, no. 12, pp. 5385-5395, Dec. 2011.

دقت کنید که توان تلفاتی سویچینگ IGBT طبق روابط ارائه شده در مرجع [۲۸] محاسبه و منظور می‌شود. اشاره به آن روابط در اینجا، از حوصله مقاله خارج است. حال می‌توان به منظور ارزیابی اینورتر، در یک مقایسه ساده برای اینورتر پیشنهادی با چند اینورتر نوعی، می‌توان جدول زیر را محاسبه و تدوین نمود.

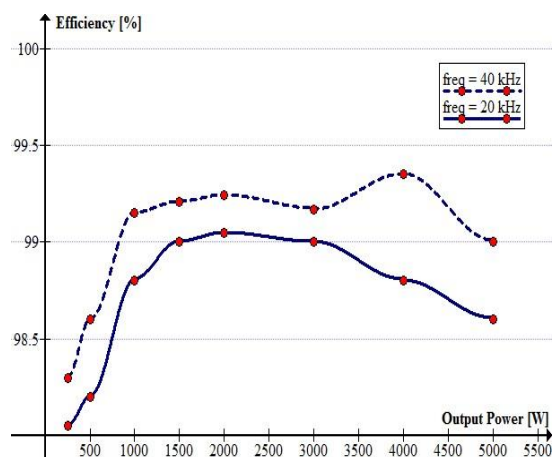
جدول ۲. مقایسه تلفات اینورتر پیشنهادی با چند اینورتر معروف

توان خروجی [W]	مجموع تلفات توان [W]			
	H5	HERIC	H6	مبدل پیشنهادی
۵۰۰۰	۷۵/۰	۵۵/۳	۹۴/۶	۵۲/۲
۲۵۰۰	۲۷/۷	۲۰/۴	۳۵/۰	۱۸/۸
۱۵۰۰	۱۴/۵	۱۰/۷	۱۸/۳	۸/۴
۱۰۰۰	۹/۲	۶/۸	۱۱/۵	۵/۱
۵۰۰	۴/۶	۳/۶	۵/۷	۲/۲
۲۵۰	۲/۷	۲/۲	۳/۲	۱/۹

از آنجایی طبق جدول ۳ که در اینورتر پیشنهادی تعداد عناصر نیمه رسانای قرار گرفته در مسیر جریان کمتر است، لذا راندمان آن بالاتر خواهد بود. اکنون اگر اینورتر را در دو فرکانس مختلف ۲۰ و ۴۰ کیلوهرتز مورد بهره‌برداری قرار دهیم، نمودار بازده بر حسب توان خروجی به شرح شکل (۲۲) خواهد بود.

جدول ۳. مقایسه تعداد المان‌های اینورتر پیشنهادی با چند اینورتر معروف در دو حالت کاری Freewheel و Active

حالت کاری	تعداد المان‌ها			
	H5	HERIC	H6	مبدل پیشنهادی
Active	۳ کلید	۲ کلید	۳ کلید	۲ کلید
Freewheel	۲ کلید	۲ کلید	یک کلید و یک دیود	یک کلید و یک دیود



شکل ۲۲. نمودار بازدهی اینورتر بر حسب توان خروجی

- Photovoltaics,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 29, no.4, pp. 841 – 850, Apr. 2014.
- [20] Meneses, F. Blaabjerg, X. E. Garc, O. A and J. A. Cobos, “Review and Comparison of Step-Up Transformerless Topologies for Photovoltaic AC-Module Application,” IEEE Transactions on Power Electronic, vol. 28, no. 6, pp. 2649-2663, Jun. 2013.
- [21] R. González, E. Gubía, J. López and L. Marroyo, “Transformerless Single-Phase Multilevel-Based Photovoltaic Inverter,” IEEE Transactions on Industrial Electronic, vol. 55, no. 7, pp. 2694-2702, Jul. 2008.
- [22] J. Pou, R. Pindado and D. Boroyevich, “Voltage-balance limits in fourlevel diode-clamped converters with passive front ends,” IEEE Transactions on Industrial Electronic, vol. 52, no. 1, pp. 190-196, Feb. 2005.
- [23] T. Bruckner, S. Bernet and H. Guldner, “The Active NPC Converter and Its Loss-Balancing Control,” IEEE Transactions on Industrial Electronic, vol. 52, no. 3, pp. 855-867, Jun. 2005.
- [24] H. Xiao and S. Xie, “Transformerless Split-inductor Neutral Point Clamped Three-level PV Grid-Connected Inverter,” IEEE Transactions on Industrial Electronic, vol. 4, no. 27, pp. 1799-1808, Aug. 2011.
- [25] B. Yang, W. Li, Y. Gu, W. Cui and X. He, “Improved Transformerless Inverter With Common-Mode Leakage Current Elimination for a Photovoltaic Grid-Connected Power System,” IEEE Transactions on Power Electronic, vol. 27, no. 2, pp. 752-762, Feb. 2012.
- [26] H. Xiao, S. Xie, Y. Chen and R. Huang, “An Optimized Transformerless Photovoltaic Grid-Connected Inverter,” IEEE Transactions on Industrial Electronic, vol. 58, no. 5, pp. 1887-1895, May 2011.
- [27] W. Yu, J. Lai, H. Qian, and C. Hutchens, “High-efficiency MOSFET inverter with H6-type configuration for photovoltaic nonisolated ac-module applications,” IEEE Transactions on Power Electronic, vol. 26, no. 4, pp. 1253-1260, Apr. 2011.
- [28] W. J. Cha, K. T. Kim, Y. W. Cho, S. H. Lee and B. H. Kwon, "Evaluation and analysis of transformerless photovoltaic inverter topology for efficiency improvement and reduction of leakage current," IET Power Electronics, vol. 8, no. 2, pp. 255-267, 2 2015.
- [7] M. C. Cavalcanti, A. M. Farias, K. C. Oliveira, F. A. S. Neves and J. L. Afonso, “Eliminating Leakage Currents in Neutral Point Clamped Inverters for Photovoltaic Systems,” IEEE Transactions on Industrial Electronic, vol. 59, no. 1, pp. 435-443, Jan. 2012.
- [8] M. C. Cavalcanti, K. C. de Oliveira, A. M. de Farias, F. A. S. Neves, G. M. S. Azevedo, and F. Camboim, “Modulation techniques to eliminate leakage currents in transformerless three-phase photovoltaic systems,” IEEE Transactions on Industrial Electronic, vol. 57, no. 4, pp. 1360-1368, Apr. 2010.
- [9] Y. Song and B., Wang, “Survey on Reliability of Power Electronic Systems,” IEEE Transactions on Power Electronic, vol. 28, no. 1, pp. 591-604, Jan. 2013.
- [10] “IEEE Application Guide For Std 1547, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems”, IEEE Standard 1547.2-2008, 2009.
- [11] “Standard for Inverters, Converters, Controllers and Interconnection System Equipment for Use With Distributed Energy Resource”s, UL 1741, 2010.
- [12] “Automatic disconnection device between a generator and the public low-voltage grid”, DIN VDE V 0126-1-1, 2006.
- [13] Steca Grid. [Online]. Available: www.steca.com.
- [14] Goodway. [Online]. Available: www.goodwe.com.
- [15] K. Moslehi and R . Kumar, “A reliability perspective of the smart grid,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 1, no. 1, pp. 57-64, Jun. 2010.
- [16] P. Wikstrom, L. A . Terens and H. Kobi, “Reliability, availability, and maintainability of high-power variable-speed drive systems,” IEEE Transactions on Industrial Applications, vol. 36, no. 1, pp. 231-241, Jan./Feb. 2000.
- [17] G. A. Klutke, Peter C. Kiessler and M. A. Wortman. “A critical look at the Bathtub curve,” IEEE Transactions on Reliability, vol. 52, no. 1, pp. 125-129, Mar. 2003.
- [18] A. Goodrich, T. James and M. Woodhouse, “Residential, Commercial, and Utility-Scale Photovoltaic (PV) System Prices in the United States: Current Drivers and Cost-Reduction Opportunities,” 2012.
- [19] L. V. Nguyen, H. Tran, T. T. Johnson, “Virtual Prototyping for Distributed Control of a Fault-Tolerant Modular Multilevel Inverter for

