اولین کنفرانس انرژی های تجدیدپذیر و تولید پراکنده ایران
The First Iranian Conference on Renewable Energies and Distributed Generation
ICREDG 2010

انتقال انرژی الکتریکی نیروگاههای فتوولتائیک به شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی با استفاده از مبدل DC/AC با هسته‌های متعامد

حامد حمزه بهمنی

چکیده - در عصر حاضر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر از اهمیت بسیار بالایی برخوردار شده است، بطوریکه اکثر کشورهای دنیا به سمت تولید انرژی الکتریکی از طریق منابع تجدیدپذیر گرایش پیدا کرده‌اند. در بین انواع انرژی‌های تجدیدپذیر، استفاده از انرژی خورشیدی بعنوان بزرگترین منبع تامین انرژی در عالم هستی همواره از جنبه‌های مختلف مورد توجه بوده است. با توجه به اینکه ولتاژ خروجی سلول‌های خورشیدی از نوع جریان مستقیم است، به منظور انتقال توان تولیدی آن به شبکه‌های توزیع AC معمولاً از اینورترهای منبع ولتاژ (VSI) استفاده می‌شود. طبیعتاً ولتاژ خروجی این مبدل‌ها حاوی مولفه‌های هارمونیکی است که پاکسازی آن پیچیدگی کلی سیستم و افزایش هزینه‌های طراحی، نصب و نگهداری را به دنبال دارد.

در این مقاله ابتدا یک نوع مبدل DC/AC جهت انتقال توان یک منبع ولتاژ DC مستقل به شبکه‌های AC مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ سپس کاربرد این نوع مبدل در انتقال توان سلول‌های خورشیدی به شبکه‌های توزیع محلی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

واژه‌های کلیدی **- هسته متعامد، مبدل DC/AC، انرژی خورشیدی، اینورتر موج مربعی**

1- مقدمه

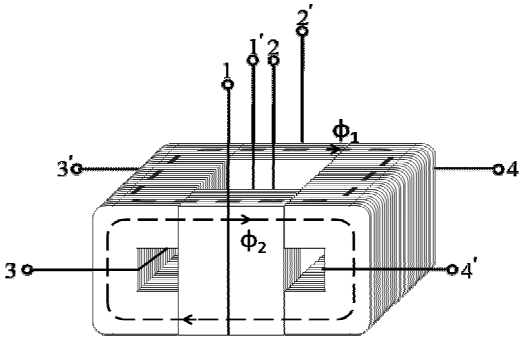
اهمیت روزافزون انرژی و استفاده از آن در تامین نیازهای زندگی انسان از یک سو و درنظر گرفتن انرژی‌های تجدیدپذیر از سوی دیگر سبب شده که در چند سال اخیر توجه ویژه‌ای به انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع تامین انرژی پایدار معطوف شود. در سیستم فتوولتائیک، انرژی الکتریکی در اثر تابش نور خورشید و بدون استفاده از مکانیزم‌های متحرک تولید می‌شود. در نیروگاههای خورشیدی، انرژی سیستم فتوولتائیک ابتدا به ولتاژ AC قابل کنترل و با کیفیت توان مناسب تبدیل شود. در این قبیل سیستم‌ها معمولاً از اینورترهای منبع ولتاژ (VSI) استفاده می‌شود. طراحی این سیستم‌ها باید به گونه‌ای باشد که دارای قابلیت هارمونیک زدایی باشند بطوریکه توان سیستم فتوولتائیک بدون ایجاد مولفه‌های هارمونیکی به شبکه AC منتقل شود که در مجموع سبب افزایش هزینه‌های طراحی، نصب و نگهداری خواهد شد. در چند دهه اخیر توجه برخی کشورها از جمله ژاپن به سمت سلف‌های متغیر با هسته‌های متعامد و بطور کلی ترانسفورماتورهای با هسته‌های متعامد و استفاده از آنها در شبکه‌های توزیع معطوف گردیده است. جریان خروجی این نوع ترانسفورماتورها تا حد قابل قبولی سینوسی و فاقد مولفه‌های هارمونیکی است که این موضوع یکی از مزایای مهم این نوع ادوات مغناطیسی محسوب می‌شود. در این مقاله ابتدا ساختار و اصول کار این نوع ترانسفورماتورها مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ سپس کاربرد آنها در ساخت یک نوع مبدل DC/AC بمنظور انتقال توان سیستم‌های فتوولتائیک به شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در ساختار این مبدل از یک ترانسفورماتور با هسته‌های متعامد و یک اینورتر موج مربعی استفاده شده است. عملکرد این مبدل به گونه‌ای است که توان انتقالی از منبع DC به شبکه AC به

حامد حمزه‌بهمنی – عضو هیت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج
سنندج، بلوار پاسداران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج، دانشکده فنی، گروه برق
Email : hamedpwr@yahoo.com

سادگی قابل کنترل بوده و مهمتر از آن فاقد مولفه‌های هارمونیکی می‌باشد. این نوع مبدل برای کاربردهای توان پایین مانند انتقال توان یک نیروگاه خورشیدی محلی به شبکه‌های توزیع AC و یا زمینه‌های کاربردی مشابه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

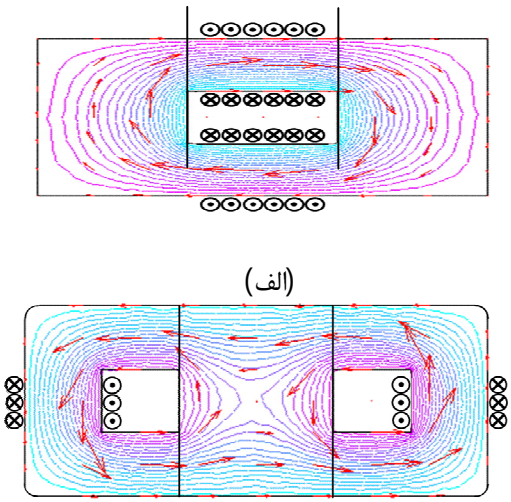
2- ساختار مبدل و اصول کار

در ساختار مدار مغناطیسی این نوع ترانسفورماتورها می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده نمود. در روشی که در اینجا دنبال می‌شود، مدار مغناطیسی متشکل از دو هسته U شکل است که به موازات یکدیگر قرار گرفته‌اند. در شکل (1) ساختار هسته و آرایش سیم‌پیچ‌های این مبدل نشان داده شده است. در اینجا سیم‌پیچ اولیه متشکل از سیم‌پیچ‌های 1-1́ و 2-2́ است که بطور سری یا موازی به یکدیگر متصل می‌شوند؛ بطور مشابه سیم‌پیچ ثانویه نیز متشکل از دو سیم‌پیچ 3-3́ و 4-4́ است که بطور سری یا موازی به یکدیگر متصل می‌شوند.



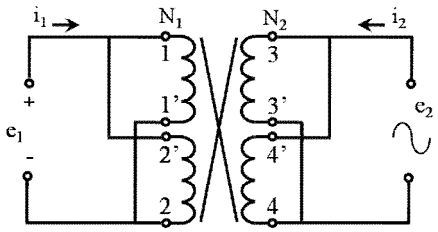
شکل 1- ساختار هسته و آرایش سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور با هسته‌های متعامد

در شکل (2) نتایج شبیه‌سازی توزیع شار ناشی از سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه با استفاده از نرم‌افزار MATLAB نشان داده شده است. در این مبدل آرایش مدار مغناطیسی و سیم‌پیچ‌ها به گونه‌ای است که مسیر شارهای اولیه φ_1 و ثانویه φ_2 بر یکدیگر عمودند و از این رو هیچ اثر متقابلی بین سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه آن وجود ندارد؛ بعبارتی تزویج مغناطیسی و اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچ‌های این مبدل صفر است. مسیرهای مغناطیسی شارهای اولیه و ثانویه که در شکل (1) نشان داده شده، بیانگر این موضوع است [4].



شکل 2- توزیع شار در هسته‌های متعامد (الف) ناشی از جریان اولیه (ب) ناشی از جریان ثانویه

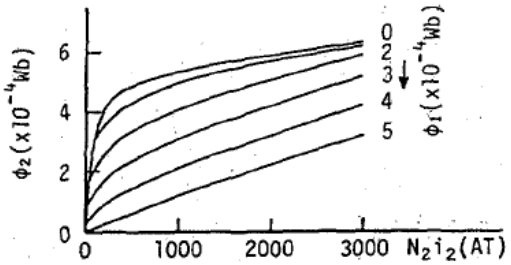
در شکل (3) مدار اساسی این مبدل در حالت تکفاز نشان داده شده است که در آن اجزاء سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه با یکدیگر موازی شده‌اند. اصول عملکرد مبدل DC/AC مورد بحث، با استفاده از این مدار بررسی می‌شود. علامت ضربدر بین سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه، بیانگر عدم وجود تزویج مغناطیسی بین این سیم‌پیچ‌ها است [5].



شکل 3- مدار معادل ترانسفورماتور تکفاز با شارهای متعامد

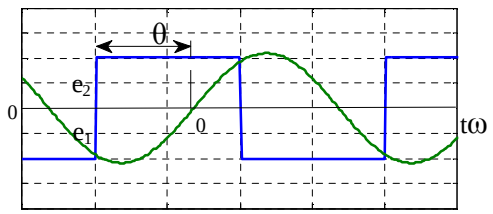
چنانچه مطابق با شکل (3)، سیم‌پیچ اولیه N_1 توسط یک منبع ولتاژ DC (با دامنه متغیر) تغذیه شود و سیم‌پیچ ثانویه N_2 به یک منبع ولتاژ AC متصل شود، با کنترل جریان DC اولیه، رلوکتانس مسیر شار ثانویه و از این رو اندوکتانس ثانویه قابل کنترل خواهد بود؛ به عبارتی اندوکتانس ثانویه توسط مشخصه‌های الکتریکی اولیه کنترل می‌شود. در شکل (4) نمونه‌ای از مشخصه‌های مغناطیسی (شارمغناطیسی برحسب

نیرومحرکه مغناطیسی (MMF)) انـدازه‌گیـری شـده در ثانویـه یک ترانسفورماتور هسته متعامد، به ازای مقادیر مختلف از شـار ثابت اولیه نشان داده شده است [2].



شکل 4- مشخصه مغناطیسی یک ترانسفورماتور هسته متعامد به ازاء مقادیر مختلف از شار ثابت اولیه

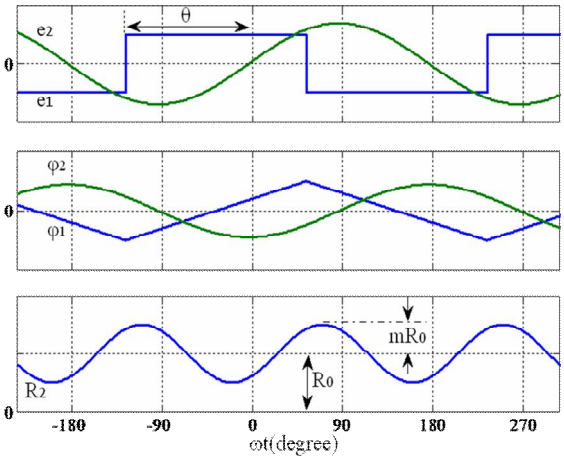
شکل (4) نشان می‌دهد که با ایجـاد تغییـرات دوره‌ای در شـار اولیه، می‌توان تغییرات دوره‌ای در رلوکتانس ثانویه ایجاد نمود. حال چنانچه سیم‌پیچ اولیه توسط یک منبع ولتاژ مـوج مربعـی با همان فرکانس ولتاژ ثانویه تغذیـه شـود، تغییـرات دوره‌ای در شار اولیه ایجاد خواهـد شـد و در پـی آن تغییـرات دوره‌ای در رلوکتانس مسیر شار ثانویه و همچنین اندوکتانس سیم‌پـیچ آن ایجاد می‌شود. به عبارتی مـی‌تـوان گفـت منحنـی مغنـاطیس شوندگی ثانویه بسته به شار اولیـه φ_1 و تغییـرات دوره‌ایـی آن می‌تواند یک تغییرات دوره‌ایی در رلوکتانس ثانویه ایجاد نمایـد. در شکل (5) شکل موج ولتاژهای e_1 و e_2 برای چنـین حـالتی نشان داده شده‌اند و همانطورکه دیده می‌شود، ولتاژ اولیه e_1 به اندازه زاویه θ نسبت به ولتاژ ثانویه e_2 تقدم فاز دارد.



شکل 5- شکل موج‌های اولیه و ثانویه ترانـسفورماتور تکفـاز بـا هسته‌های متعامد

3- معادلات اساسی و روابط حاکم

با در نظرگرفتن این فرض که تغییرات دوره‌ایی رلوکتانس مـوثر ثانویه R_2 سینوسـی باشـد، تغییـرات زمـانی ولتاژهـا، شـارها و رلوکتانس ثانویه مدار نـشان داده شـده در شـکل (3) بـصورت آنچه در شکل (6) نشان داده شده بدست خواهند آمد.



شکل 6- مشخصه‌های زمانی ولتاژها، شارها و رلوکتانس ثانویه

با استفاده از شکل فوق ولتاژ ثانویـه e_2 و رلوکتـانس ثانویـه R_2 بصورت روابط زیر بدست می‌آیند [2]:

$$e_2 = \sqrt{2}E_2 \sin wt \qquad (1)$$

$$R_2 = R_o[1 - m\cos 2(wt - 90^o + q)] \qquad (2)$$

در معادلات فوق E_2 مقدار مـوثر و ω فرکـانس زاویـه‌ای ولتـاژ ثانویـه، R_0 مقـدار متوسـط رلوکتـانس ثانویـه و m ضـریب مدولاسیون است که مقدار آن $0<m<1$ می‌باشد. با اسـتفاده از معادلات (1) و (2)، جریان ثانویه i_2 بصورت زیر بدست می‌آید:

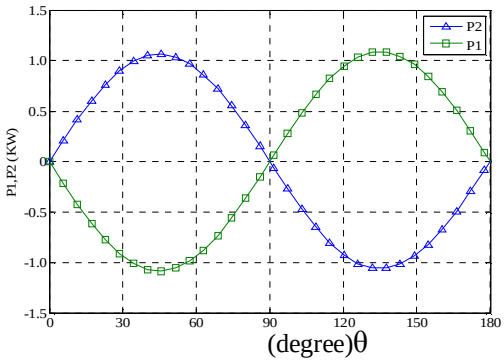
$$i_2 = \frac{R_2}{N_2^2}\int e_2 dt = \left(\frac{R_o E_2}{\sqrt{2}wN_2^2}\right)[m\sin 2q \sin wt - (2 + m\cos 2q)\cos wt] \qquad (3)$$

و نهایتـاً تـوان ثانویـه p_2 بـا اسـتفاده از معـادلات (1) و (3)، بصورت زیر بدست می‌آید:

$$p_2 = \frac{1}{T}\int_0^T e_2 i_2 dt = \left(\frac{mR_o E_2^2}{2wN_2^2}\right)\sin 2q \qquad (4)$$

معادله اخیر نشان می‌دهد کـه مقـدار و جهـت تـوان خروجـی مبدل با تغییر در زاویه اختلاف فاز بین ولتاژهای اولیه و ثانویـه θ قابل کنترل می‌باشـد و هـم اینکـه ایـن تـوان بـرای مقـادیر $90°<\theta<180°$ منفی است؛ منفی شدن توان به منزلـه انتقـال توان از اولیه مبدل به ثانویه آن است. بنابراین بمنظور انتقـال و کنترل توان از اولیـه بـه ثانویـه، لازم اسـت زاویـه θ بـین $90°$

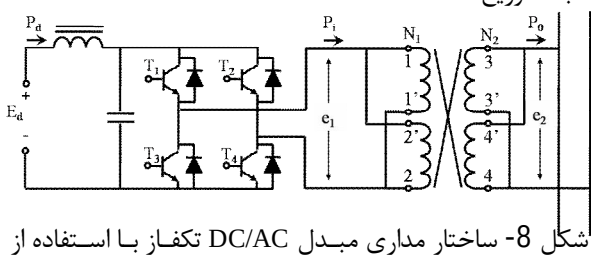
و°180 تغییر داده شود. در شکل (7) نتایج شبیه‌سازی توان‌های اولیه p_1 و ثانویه p_2 برحسب زاویه فاز θ برای یک نمونه ترانسفورماتور با هسته‌های متعامد نشان داده شده است.



شکل 7- مشخصه توان‌های اولیه و ثانویه بر حسب زاویه θ

4- مبدل DC/AC تکفاز:

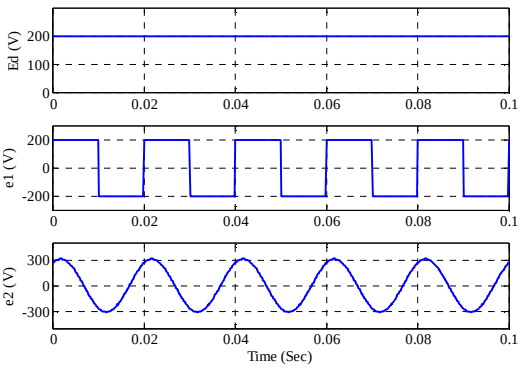
به منظور استفاده از این نوع مبدل در انتقال توان یک منبع ولتاژ DC به یک شبکه توزیع AC ، می‌توان از یک اینورتر ولتاژ موج مربعی جهت تبدیل ولتاژ DC منبع ورودی به یک ولتاژ موج مربعی متناوب در ورودی مبدل استفاده نمود. ساختار مداری چنین مبدلی در شکل (8) نشان داده شده است. در این شکل، E_d ولتاژ منبع DC ، e_1 ولتاژ ورودی ترانسفورماتور هسته متعامد، e_2 ولتاژ شبکه توزیع AC و P_d توان انتقالی از منبع DC به شبکه توزیع AC می‌باشد.



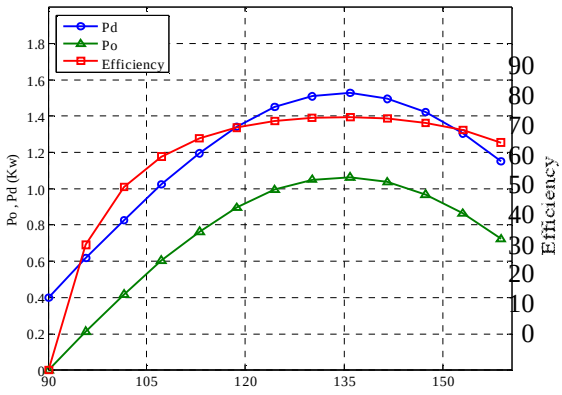
شکل 8- ساختار مداری مبدل DC/AC تکفاز با استفاده از ترانسفورماتور با هسته‌های متعامد

با توجه به مبدل اینورتری استفاده شده، e_1 یک ولتاژ AC مربعی با دامنه برابر با E_d است. در این مبدل، توان مورد نیاز بارهای متصل به شبکه AC از طریق هر دو منبع DC و AC تامین می‌شود. با توجه به رابطه (4)، توان انتقالی از منبع ولتاژ E_d به شبکه توزیع AC با تغییر در زاویه اختلاف فاز بین ولتاژهای e_1 و e_2 از صفر تا مقدار حداکثر قابل کنترل می‌باشد. ایجاد اختلاف فاز بین ولتاژهای e_1 و e_2 به سادگی با تغییر در زاویه آتش المان‌های کلیدی مدار اینورتر (ترانزیستورهای T1 تا T4) انجام می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی مدل نشان داده شده در شکل (8) با مقادیر و مشخصات مندرج در جدول (1)، در شکل‌های (9) تا (11) نشان داده شده است. شکل (9) شکل موج ولتاژهای E_d ، e_1 و e_2 و شکل (10) مشخصه‌های توانی مبدل را بر حسب زاویه فاز θ نشان می‌دهد. در این مشخصه‌ها p_d توان منبع DC ، p_o توان AC تغذیه شده به شبکه AC و η راندمان مبدل است. همچنین در شکل (11) شکل موج‌های ولتاژ و جریان ثانویه مبدل برای سه مقدار از زاویه اختلاف فاز، $\theta=105^o$ ، $\theta=120^o$ و $\theta=135^o$ نشان داده شده است.

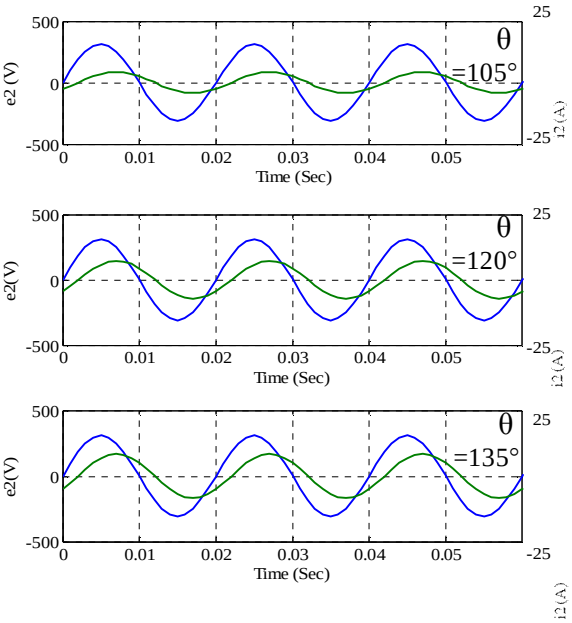


شکل 9- شکل موج ولتاژهای Ed ، e1 و e2 مبدل DC/AC تکفاز با هسته‌های متعامد



شکل 10- مشخصه‌های توان DC و توان انتقالی مبدل DC/AC تکفاز با هسته‌های متعامد

در جدول (2) اندازه توان انتقالی مبدل برای زوایای مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل 11- شکل موج‌های ولتاژ و جریان مبدل DC/AC تکفاز با هسته‌های متعامد برای زوایای فاز 105 ، 120 و 135 درجه

جدول 1- مشخصات مدل شبیه‌سازی شده مبدل DC/AC

منابع ولتاژ	اندازه ولتاژ (V)
منبع DC	E_1=200V
شبکه AC	E_2=220V
فرکانس شبکه	f=50Hz

سیم‌پیچ‌ها	تعداد دور	مقاومت (Ω)
اولیه	N_1=1090	r_1=6,5
ثانویه	N_2=200	r_2=0,43

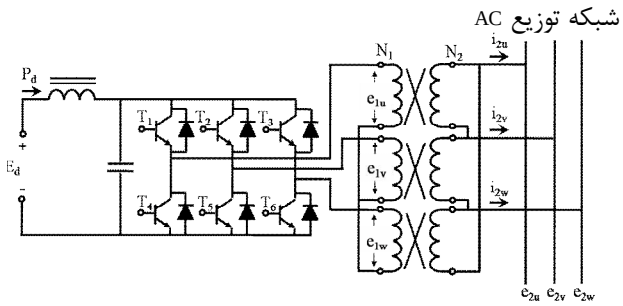
جدول 2- مقادیر توان انتقالی مبدل تکفاز با هسته‌های متعامد

ردیف	زاویه فاز (Deg)	توان انتقالی (W)
1	105	520
2	120	920
3	135	1060
4	150	915

مطابق با شکل‌های (11) جریان ثانویه این مبدل، سینوسی و فاقد مولفه‌های هارمونیکی است. بنابراین همانطور که در مقدمه نیز ذکر شد با استفاده از این نوع مبدل، توان منبع DC بدون ایجاد مولفه‌های هارمونیکی، به شبکه AC منتقل می‌شود. این موضوع یکی از مزایای بسیار مهم ترانسفورماتورهای هسته متعامد است[6] و [7].

5- مبدل DC/AC سه‌فاز:

در شکل (12) مدار معادل مبدل DC/AC سه‌فاز با هسته‌های متعامد نشان داده شده است. در این مبدل از سه ترانسفورماتور هسته متعامد با مشخصات کاملاً یکسان و یک اینورتر ولتاژ موج مربعی سه‌فاز استفاده شده است. سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتورها با اتصال λ/Δ بسته شده‌اند. اینورتر سه‌فاز بکاررفته در ورودی مبدل، یک سیستم ولتاژ سه‌فاز موج مربعی را در ورودی ترانسفورماتورها ایجاد می‌کند.



شکل 12- ساختار مداری مبدل DC/AC سه‌فاز با استفاده از ترانسفورماتور با هسته‌های متعامد

با استفاده از این مبدل، این امکان فراهم می‌شود که توان تولیدی یک منبع DC به یک شبکه سه‌فاز AC منتقل شود. مشابه مبدل DC/AC تکفاز، توان مورد نیاز بارهای متصل به شبکه سه‌فاز AC ، هم از طریق منبع ولتاژ DC و هم از طریق شبکه سه‌فاز AC تامین می‌شود و توان انتقالی از منبع ولتاژ DC به شبکه سه‌فاز AC با تغییر در زاویه اختلاف فاز بین ولتاژهای فازی e_1 و e_2 قابل کنترل است. مقادیر و مشخصات این مبدل مطابق مندرجات جدول (1) می‌باشد.

با توجه به مطالب قبلی، تغییرات زمانی رلوکتانس ثانویه R_2 بصورت رابطه زیر تقریب زده می‌شود [2]:

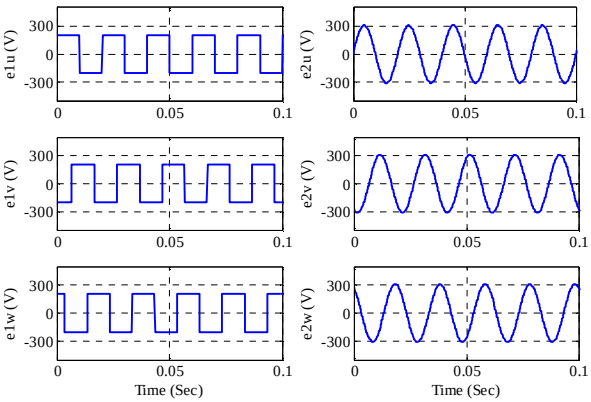
$$R_2 = R_o[1 - m\cos 2(wt - 60^o + q)] \qquad (5)$$

و با استفاده از معادله (5)، توان ثانویه p_2 به همان روش ذکر شده در مورد معادله (4) بصورت زیر بدست می‌آید:

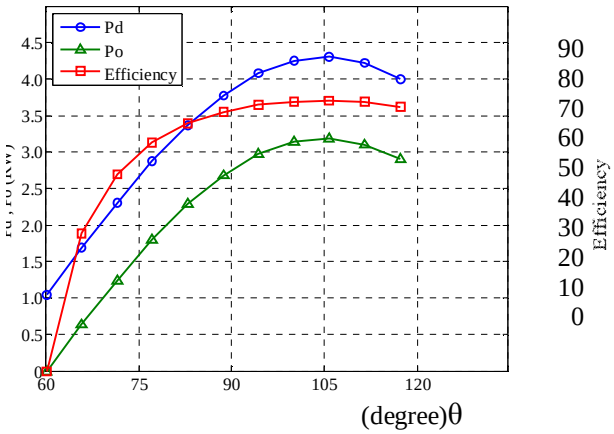
$$p_2 = (\frac{mR_oE_2^2}{2wN_2^2})\sin 2(60^o - q) \qquad (6)$$

معادله اخیر نشان می‌دهد که توان منبع DC در محدوده زاویه فاز $60^o<\theta<150^o$ به شبکه سه‌فاز AC انتقال داده می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی مدار شکل (12) با همان مقادیر و مشخصات مبدل تکفاز، شامل ولتاژهای سه‌فاز e_1 و e_2 ، مشخصه‌های توانی و شکل موج‌های جریان ثانویه مبدل برای سه مقدار از زاویه اختلاف فاز، $\theta=75^o$ ، $\theta=90^o$ و $\theta=105^o$ به ترتیب در شکل‌های (13) تا (15) نشان داده شده‌اند.

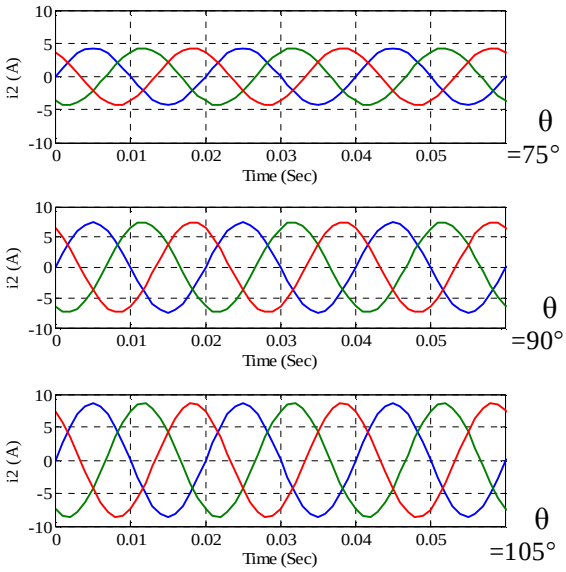


شکل 13- شکل موج ولتاژهای e1 و e2 مبدل DC/AC سه‌فاز با هسته‌های متعامد



شکل 14- مشخصه‌های توان DC و توان انتقالی مبدل DC/AC سه‌فاز با هسته‌های متعامد

اندازه توان انتقالی مبدل برای زوایای مورد مطالعه در جدول (3) نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی در این حالت نیز نشان می‌دهد که جریان ثانویه این نوع مبدل، فاقد مولفه‌های هارمونیکی است.



شکل 15- شکل موج جریان‌های ثانویه مبدل DC/AC سه‌فاز با هسته‌های متعامد برای زوایای فاز 75 ، 90 و 105 درجه

جدول 3- مقادیر توان انتقالی مبدل سه‌فاز با هسته‌های متعامد

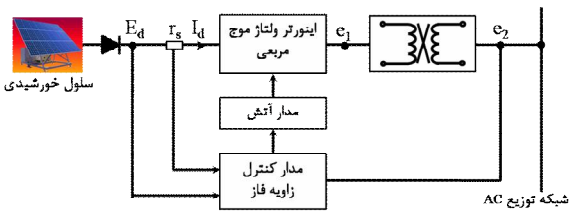
ردیف	زاویه فاز (Deg)	توان انتقالی (W)
1	75	1590
2	90	2750
3	105	3180

6- ساختار سیستم فتوولتاییک با بکارگیری مبدل DC/AC با هسته‌های متعامد:

مبدل DC/AC مورد بحث در هر کاربردی که نیاز به انتقال توان از یک منبع ولتاژ DC مستقل به یک شبکه توزیع AC

(تکفاز یا سه‌فاز) باشد، می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. یکی از کاربردهای مفید این مبدل در اتصال یک نیروگاه خورشیدی محلی به یک شبکه توزیع AC است. در شکل (16) ساختار اساسی سیستم انتقال توان یک نیروگاه خورشیدی محلی نشان داده شده است که در آن از یک مبدل DC/AC با هسته‌های متعامد استفاده شده است. در این سیستم، مدار کنترل کننده فاز با تغییر در زاویه آتش المان‌های کلیدی اینورتر، زاویه اختلاف فاز بین ولتاژهای e_1 و e_2 را تغییر داده و از این طریق توان منتقل شده از سلول‌های خورشیدی به شبکه توزیع AC کنترل می‌شود. در این مدار r_s مقاومت شنت است که به منظور اندازه‌گیری جریان DC استفاده شده است [1].

از آنجاییکه توان خروجی سلول‌های خورشیدی با تشعشع نور خورشید تغییر می‌کند، به منظور استفاده موثر و بهینه از انرژی خورشیدی لازم است که توان منتقل شده از آن متناسب با تشعشع انرژی خورشیدی کنترل شود. مبدل DC/AC با هسته‌های متعامد این امکان را فراهم می‌کند که با یک مدار کنترل کننده و یک استراتژی کنترلی ساده، کنترل کاملاً دقیق و مناسبی روی توان انتقالی از سلول‌های خورشیدی به شبکه توزیع ایجاد نمود.



شکل 16- ساختار سیستم انتقال توان یک نیروگاه خورشیدی محلی با بکارگیری ترانسفورماتور هسته متعامد

در این سیستم، مدار کنترل کننده زاویه فاز با اندازه‌گیری ولتاژ و جریان DC و تغییر در زاویه آتش المان‌های کلیدی، زاویه اختلاف فاز θ را در جهت مطلوب کنترل می‌کند.

نتیجه‌گیری

بر اساس بررسی‌هایی که در این مقاله در مورد مبدل‌های DC/AC با هسته‌های متعامد به عمل آمد، می‌توان مزایای این روش انتقال توان را به صورت زیر عنوان نمود:

توان انتقالی از منبع DC به شبکه AC به سادگی قابل کنترل است.

توان از منبع DC به شبکه AC ، در رنج وسیعی از ولتاژ DC قابل انتقال است.

توان منبع DC بدون ایجاد مولفه‌های هارمونیکی به شبکه AC منتقل می‌شود.

ایزولاسیون بین منبع ولتاژ DC و شبکه توزیع AC مناسب است.

ساختار مداری این مبدل ساده و بدون هیچ‌گونه پیچیدگی است.

عملکرد مدار ساده و نیاز به تعمیرات و نگهداری‌های دوره‌ایی ندارد.

با توجه به مطالعاتی که در کشور ما در زمینه انرژی خورشیدی صورت گرفته، پتانسیل‌های بسیار خوبی برای استفاده از انرژی خورشیدی وجود دارد. امید است بتوان در آینده‌ایی نزدیک از این منبع انرژی و سایر منابع تجدیدپذیر دیگر در جهت رشد و پیشرفت هر چه بهتر صنعت برق کشورمان استفاده نماییم.

مراجع

[1] O.Ichinokura M.Maeda and K.Mitamura "CHARACTERISTICS OF ORTHOGONAL-CORE TYPE DC-AC CONVERTER AND ITS APPLICATION TO A PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEM" IEEE TRANS ON MAGNETICS, VOL. MAG-22, NO 5, 1986

[2] O.Ichinokura, S.Kikuchi and K.Murakami *"OPERATING CHARACTERISTICS OF COUPLING-DECOUPLING TRANSFORMER"* IEEE TRANS ON MAGNETICS, VOL. MAG-19, NO. 5, 1983

[3] W. *Z.* Fam and *G.* K. Bahl *" TWO RELATED TYPES OF PARAMETRIC TRNASFORMER"* IEEE Trans On Magnetics , Vol.10, Issue 3, 1974

[4] Wanlass SD. *"The Paraformer"* IEEE Wescon Tech Papers 1968

[5] حامد حمزه‌بهمنی، "*مطالعه و کاربردهای سلف‌های متغیر با هسته‌های متعامد*" سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی برق، 1385

[6] حامد حمزه‌بهمنی، عباس شولایی "کنترل توان راکتیو شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی با استفاده از سلف‌های متغیر با هسته‌های متعامد و بررسی نتایج آزمایشگاهی" سیزدهمین کنفرانس شبکه‌های توزیع، 1386

[7] O. Ichinokura and K. Murakami "ANALYSIS OF ORTHOGONAL-CORE TYPE TRANSFORMER FOR DC-AC INTERCONNECTION SYSTEM" IEEE TRANS ON MAGNETICS, VOL. MAG-21, NO. 5, 1985