

# کاهش نوسان ولتاژ و گشتاور ژنراتور القایی دو سو تغذیه توسط اینورتر ترستوری دو یا چند سطحی

یونس سنگ سفیدی<sup>۱</sup>، صالح ضیایی نژاد<sup>۲</sup>، علیرضا جلیلیان<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- استادیار دانشکده مهندسی برق، قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، دانشگاه

علم و صنعت ایران

jalilian@iust.ac.ir

(دریافت مقاله: ۸۸)

**چکیده-** این مقاله، روش‌هایی برای تضعیف پدیده فلیکر و همچنین کاهش نوسان گشتاور و توان در ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه (DFIGs) که روتورشان با استفاده از مبدل‌های ترستوری تغذیه می‌شود، ارائه می‌کند. ابتدا نحوه تاثیر هارمونیک‌های روتور در ایجاد میان‌هارمونیک‌ها در ولتاژ استاتور و همچنین نحوه ایجاد نوسان گشتاور بررسی شده و سپس روش‌هایی برای حذف انتخابی هارمونیک‌های تولیدی ارائه می‌شود. روش‌های ارائه شده شامل حذف انتخابی هارمونیک‌ها در مبدل‌های دو سطحی و چند سطحی با زوایای کلیدزنی کنترل شده، با دو رویکرد حذف زیرهارمونی‌های با فرکانس کمتر از ۴۰ هرتز، به منظور کاهش پدیده فلیکر و حذف هارمونی‌های میانی با فرکانس کمتر از ۱۲۰ هرتز به منظور بهبود کیفیت ولتاژ می‌باشد. شبیه‌سازی ژنراتور القایی دو سو تغذیه در دو حالت مجزا از شبکه و متصل به شبکه انجام شده است که موثر بودن روش‌های پیشنهادی را نشان می‌دهد.

**کلید واژگان:** ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG)، میان‌هارمونیک، زیرهارمونیک، فلیکر، حذف انتخابی هارمونیک، اینورتر چند سطحی

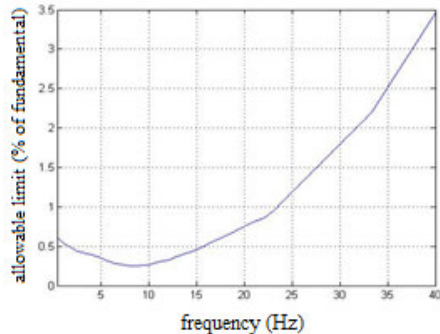
شده‌اند، تغذیه روتور از طریق یک منبع ولتاژ با دامنه و فرکانس کنترل شده تامین می‌گردد که عموماً از اینورترهای سه‌فاز برای این منظور استفاده می‌گردد. برای کنترل اینورتر عمده‌تاً از روش‌هایی چون PWM و SVM بهره گرفته می‌شود [۱ و ۲] ولی در مورد ژنراتورهای القایی توان بالا، روتور آن‌ها توسط مبدل‌های ترستوری تغذیه می‌شود. در این مبدل‌ها محدودیت فرکانس کاری ترستورها، کلیدزنی فرکانس بالا را

## ۱- مقدمه

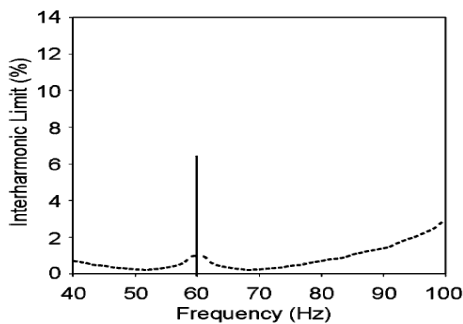
ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه<sup>۱</sup> به دلیل فراهم آوردن امکان تامین ولتاژ با دامنه و فرکانس ثابت در پایانه‌های استاتور با وجود متغیر بودن سرعت چرخش روتور، در نیروگاه‌های بادی مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این ژنراتورها که تا محدوده توانی چند مگاوات ساخته

### 1. Doubly-Fed Induction Generator (DFIG)

ناممکن می‌سازد. در اینورترهای ترისტوری عمدتاً از روش کلیدزنی شش مرحله‌ای بهره گرفته می‌شود.



شکل ۱ درصد مجاز زیرهارمونی‌ها مطابق IEEE1453 [۹]



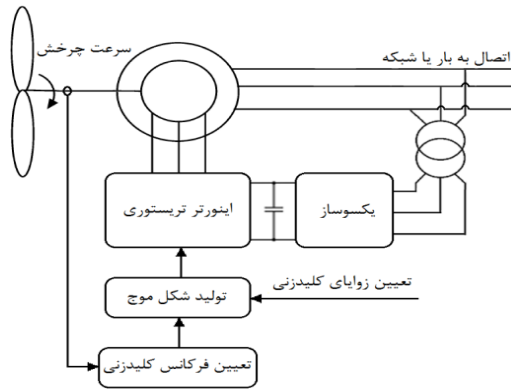
شکل ۲ درصد مجاز پیشنهاد شده برای میان‌هارمونی‌های با فرکانس کمتر از هارمونی دوم [۸]

استفاده از روش کلیدزنی شش مرحله‌ای سیستم کنترل را ساده می‌کند ولی مهم‌ترین ضعف آن دارا بودن کلیه هارمونی‌های مرتبه  $6n \pm 1$  می‌باشد. THD ولتاژ تولید شده در این روش در حدود ۳۰٪ می‌باشد. در نتیجه هارمونیکی شدن ولتاژ تغذیه روتور، جریان روتور نیز هارمونیکی می‌گردد. مدار معادل DFIG در [۳] ارائه شده است و نحوه تعیین پارامترهای این مدار معادل در تحلیل مولفه‌های هارمونیکی جریان روتور و نیز مولفه‌های توالی منفی ولتاژ استاتور در [۵و۴] بیان شده است.

وجود هارمونی‌های روتور علاوه بر ایجاد نوسان گشتاور، باعث ایجاد میان‌هارمونی در پایانه‌های استاتور می‌شود. میان‌هارمونی‌ها، دارای فرکانسی به صورت مضرب غیر صحیح از فرکانس اصلی بوده و زیرهارمونی‌ها، میان‌هارمونی‌هایی با فرکانسی کمتر از فرکانس اصلی می‌باشند [۶]. وجود میان‌هارمونی‌ها و زیرهارمونی‌ها باعث افزایش تلفات و نوسان گشتاور بارهای موتوری می‌شود و در عملکرد بارهای حساس و سیستم‌های مخابراتی اختلال ایجاد می‌کند. همچنین در صورتی که فرکانس آن کمتر از ۴۰ هرتز باشد، موجب ایجاد پدیده فلیکر می‌شود. [۷].

استاندارد مشخصی برای تعیین حداکثر دامنه مجاز هر اینترهارمونی در حالت کلی وجود ندارد [۸]. دامنه مجاز هر زیر هارمونی منفرد بر اساس فلیکر ایجاد شده در شبکه‌های توزیع در شکل ۱ نمایش داده شده است. دامنه مجاز میان‌هارمونی‌های با فرکانس کمتر از هارمونی دوم، براساس مقدار تغییر ایجاد شده در مقدار موثر ولتاژ و قرائت فلیکرمتر ساخته شده مبتنی بر استاندارد

با حذف هارمونی‌های خاصی در تغذیه روتور می‌توان میان‌هارمونی‌های فرکانس پایین ولتاژ خروجی ژنراتور را حذف نمود. در این مقاله، استفاده از مبدل‌های دو یا چند سطحی جهت حذف گزینشی هارمونی‌های تغذیه روتور در ژنراتورهای القایی پیشنهاد می‌گردد. مبدل‌های چندسطحی در کاربردهایی چون محرکه‌های ولتاژ متوسط، مبدل‌های انرژی‌های نو و ادوات FACTS مورد استفاده قرار می‌گیرند. [۱۰] در شکل ۳ یک اینورتر چندسطحی پل H از نوع cascade نشان داده شده است. گرچه تا کنون روش‌های گوناگونی برای تعیین زوایای کلیدزنی اینورتر چند سطحی جهت حذف گزینشی هارمونی‌ها



شکل ۴ شمای ژنراتور القایی و ساختار مبدل الکترونیک قدرت مدار روتور

در صورت اعمال ولتاژ متناوب سه فاز با فرکانس  $\omega_r$  و چرخش محور روتور با سرعت الکتریکی  $\omega_m$ ، در طرف استاتور ولتاژ متناوب سه فاز با فرکانس  $\omega_s = \omega_r + \omega_m$  ایجاد می‌شود. به دلیل این که دائما سرعت باد در حال تغییر است، باید فرکانس تغذیه روتور به صورتی تنظیم شود که فرکانس ولتاژ استاتور همواره برابر با مقدار نامی باشد.

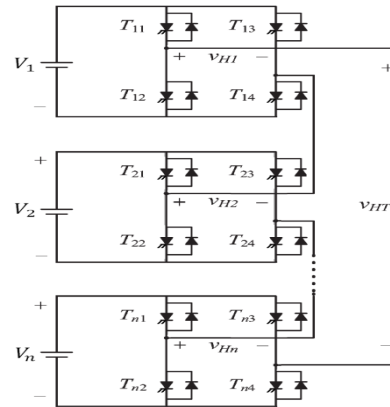
در کاربردهای جریان بالا که از اینورترهای مبتنی بر تریستور استفاده می‌شود، به دلیل محدودیت فرکانس کاری تریستور، عمدتا از کلیدزنی شش مرحله‌ای استفاده می‌شود. در ادامه نوسان ولتاژ ناشی از این کلیدزنی تحلیل می‌شود.

## ۲-۱- نوسان ولتاژ ژنراتور القایی دو سو تغذیه

ولتاژ تولید شده در روش کلیدزنی شش مرحله‌ای دارای هارمونی‌های  $6n \pm 1$  است و دامنه هارمونی  $k$  ام برابر با  $\frac{1}{k}$  می‌باشد [۱۱]. هارمونی‌های با مرتبه  $6n-1$  هارمونی‌هایی با توالی منفی و با فرکانس  $(6n-1)\omega_r$  هستند و هارمونی‌های با مرتبه  $6n+1$  هارمونی‌هایی با توالی مثبت و با فرکانس  $(6n+1)\omega_r$  هستند. منفی

ارائه شده است، ولی [۱۰] روشی را ارائه کرده است که هم از نظر سرعت و هم از نظر دقت محاسبه قابل قبول‌تر از سایر روش‌ها می‌باشد که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است.

در این مقاله، نوسان ولتاژ و گشتاور ژنراتور القایی دو سو تغذیه بررسی می‌شود و برای کاهش آن‌ها، حذف گزینشی هارمونی‌ها توسط اینورترهای دو یا چند سطحی پیشنهاد می‌گردد. همچنین نتایج شبیه‌سازی ژنراتور القایی، جهت سنجش کارایی روش‌های پیشنهادی در دو حالت مجزا از شبکه و متصل به شبکه ارائه می‌شود.



شکل ۳ شمای یک فاز از اینورتر چندسطحی پل H از نوع cascade با چاپر تریستوری

## ۲-۲ اصول عملکرد ژنراتور القایی دو سو تغذیه

شکل ۴، شمای کلی یک ژنراتور القایی دو سو تغذیه و مبدل تغذیه کننده روتور آن را نشان می‌دهد.

هرتز در ولتاژ استاتور می‌شوند، حذف گردند. رویکرد دوم، حذف هارمونی‌هایی در تغذیه روتور است که در طرف استاتور میان‌هارمونی‌های با فرکانس کمتر از ۱۲۰ هرتز ایجاد می‌کنند.

فرکانس تغذیه روتور عامل تعیین کننده در ایجاد مولفه‌های با فرکانس کمتر از ۴۰ یا ۱۲۰ هرتز در طرف استاتور می‌باشد (جدول ۱). مشاهده می‌گردد که با کاهش فرکانس تغذیه روتور، تعداد هارمونی‌های ایجاد کننده مشکل افزایش می‌یابد. فرض شده است که در بیشتر مواقع، فرکانس تغذیه روتور از ۷/۵ هرتز بیشتر است و تحلیل در این شرایط انجام شده است.

جدول ۱ مولفه‌های فرکانسی ایجاد شده در سمت استاتور و عوامل به وجود آورنده آن‌ها در سمت روتور

فرکانس تغذیه روتور (هرتز)	۷/۵ تا ۸/۳۳	۸/۳۳ تا ۱۰	۱۰ تا ۱۵	۱۶ تا ۱۶/۶۷	۱۶/۶۷ تا ۳۰	بیش از ۳۰
هارمونی‌های ایجاد کننده فرکانس کمتر از ۴۰ هرتز در استاتور	۵ و ۱۱	۵	۵	۵	-	-
هارمونی‌های ایجاد کننده فرکانس کمتر از ۱۲۰ هرتز در استاتور	۷ و ۱۱	۷ و ۱۱	۵ و ۱۱	۵	۵	-

## ۲-۲- نوسان گشتاور ژنراتور القایی دو سو تغذیه

هارمونی‌های سمت روتور می‌توانند باعث نوسانی شدن گشتاور تولیدی DFIG شوند. وجود نوسان گشتاور باعث لرزش محور ژنراتور شده و در طولانی مدت سبب آسیب دیدن آن می‌شود. گشتاور ثابت DFIG از برهم-کنش هر هارمونی جریان روتور و مولفه انتقال یافته آن در طرف استاتور مطابق رابطه (۱) به دست می‌آید [۱۱].

$$T_{e0} = 3 \left( \frac{P}{2} \right) M \operatorname{Im} \sum_k [\bar{I}_{sk} \bar{r}_{rk}^*] \quad (1)$$

بودن علامت فرکانس، نشان دهنده توالی منفی بودن هارمونی است. بنابراین، ولتاژ استاتور مولفه‌های هارمونیکی با فرکانس  $\omega_r + \omega_m$ ،  $\omega_r - 5\omega_r + \omega_m$ ،  $7\omega_r + \omega_m$ ،  $-11\omega_r + \omega_m$ ،  $13\omega_r + \omega_m$  و ... را داراست [۲و۴]. فرکانس این مولفه‌ها مضرب صحیحی از فرکانس اصلی سیستم  $(\omega_r + \omega_m)$  نیست و این سیگنال‌ها میان‌هارمونی نامیده می‌شوند [۸].

وجود میان‌هارمونی‌ها در سیستم‌های قدرت عمومیت ندارد و بنابراین تاکنون محدودیتی برای آن‌ها در حالت کلی قرار داده نشده است، اما در توربین‌های باد که از ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه استفاده می‌کنند، وجود میان‌هارمونی‌ها یک مساله جدی است. مهم‌ترین مشکل اینترهارمونی‌های با فرکانس کمتر از فرکانس اصلی، پدیده فلیکر می‌باشد که می‌تواند کیفیت ولتاژ را کاهش داده و موجب نارضایتی مشترکین و عملکرد نادرست تجهیزات حساس شود.

استانداردها، مقدار درصد نوسان ولتاژ را بر حسب فرکانس، به صورتی که شاخص کوتاه مدت شدت فلیکر برابر ۱ شود، مشخص می‌کنند. گرچه استاندارد مشخصی در مورد میان‌هارمونی‌ها در حالت کلی وجود ندارد، ولی مقدار مجاز زیرهارمونی‌های تا فرکانس ۴۰ هرتز توسط استاندارد IEEE1453 بیان شده است. همچنین میان-هارمونی‌های با فرکانس کمتر از فرکانس هارمونی دوم، مقدار موثر ولتاژ را به طور موثری مدوله می‌کنند و می‌توانند سبب ایجاد مشکلات کیفیت توان شوند. در [۸] برای این مولفه‌ها محدوده مجاز پیشنهاد شده است.

با دو رویکرد می‌توان زیر هارمونی‌ها و میان‌هارمونی‌های موجود در ولتاژ خروجی DFIG را بررسی کرد. رویکرد اول آن است که هارمونی‌های تغذیه روتور که باعث ایجاد مولفه‌های با فرکانس کمتر از ۴۰

$$\begin{bmatrix} T_{ecos6n} \\ T_{esin6n} \end{bmatrix} = \frac{3P}{2Z} M \begin{bmatrix} -(i_{ds(6n-1)} + i_{ds(6n+1)}) & -(i_{qs(6n-1)} - i_{qs(6n+1)}) \\ (i_{qs(6n-1)} + i_{qs(6n+1)}) & (i_{ds(6n-1)} + i_{ds(6n+1)}) \\ -i_{ds1} & i_{qs1} \\ i_{qs1} & i_{ds1} \\ -i_{ds1} & -i_{qs1} \\ i_{qs1} & -i_{ds1} \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} i_{qr1} \\ i_{dr1} \\ i_{qr(6n-1)} \\ i_{dr(6n-1)} \\ i_{qr(6n+1)} \\ i_{dr(6n+1)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

با توجه به تغییرات دائمی سرعت باد و در نتیجه متغیر بودن فرکانس تغذیه روتور، استفاده از فیلترهای غیرفعال به منظور حذف هارمونی‌های مزاحم عملاً غیرممکن است. استفاده از فیلترهای فعال نیز به دلیل تغییر مولفه اصلی فرکانس و در نتیجه پیچیدگی سیستم کنترل فیلتر توصیه نمی‌شود. در ادامه دو روش دیگر برای حذف هارمونی‌های طرف روتور معرفی و مقایسه شده‌اند.

روش اول، حذف هارمونی‌های مورد نظر با انتخاب زوایای کلیدزنی مناسب در اینورترهای دو سطحی است. در این روش، برای حذف  $m$  هارمونی باید در هر نیم سیکل  $2m+1$  بار کلیدزنی صورت گیرد [۱۲]. به کار گرفتن این روش، مولفه‌های مورد نظر را حذف می‌کند ولی دامنه مولفه‌های حذف نشده را افزایش می‌دهد. همچنین با افزایش تعداد هارمونی‌های حذف شده، فرکانس کلیدزنی افزایش می‌یابد. بنابراین تعداد هارمونی‌های قابل حذف توسط فرکانس کاری ترستورها محدود می‌گردد.

روش دیگر، استفاده از اینورتر چند سطحی می‌باشد. در یک اینورتر  $m$  سطحی با زوایای کلیدزنی مناسب، می‌توان  $m-1$  هارمونی را حذف کرد. بنابراین برای حذف مولفه‌های با فرکانس کمتر از  $40$  هرتز در طرف استاتور،

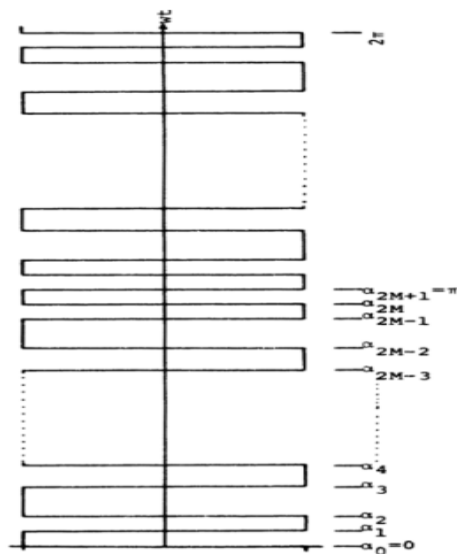
که در آن  $\bar{I}_k = \frac{i_{qk} - j i_{dk}}{\sqrt{2}}$  و  $k=1,5,7,\dots$  و  $i_{qk}$  و  $i_{dk}$  در قاب مرجع گردان با سرعتی برابر با  $k\omega_r + \omega_m$  به شرط  $k = 6n + 1$  و یا سرعتی برابر با  $-k\omega_r + \omega_m$  به شرط  $k = 6n - 1$  می‌چرخند..

گشتاور ضربانی DFIG از برهم‌کنش هر هارمونی جریان روتور و مولفه انتقال‌یافته دیگر هارمونی‌های جریان روتور در طرف استاتور ایجاد می‌شود. وجود هارمونی اصلی و هارمونی  $(6n \pm 1)$  ام باعث ایجاد دو مولفه فرکانسی در گشتاور تولیدی، یکی با فرکانس  $6n\omega_r$  و دیگری با فرکانس  $-6n\omega_r$  می‌شود. گشتاور ضربانی ناشی از وجود هارمونی اصلی و دو هارمونی  $6n - 1$  و  $6n + 1$  از (۲) به دست می‌آید [۴].

$$T_{e6n} = T_{ecos6n} \cos(6n\omega_r t) + T_{esin6n} \sin(6n\omega_r t) \quad (2)$$

که  $T_{ecos6n}$  و  $T_{esin6n}$  مولفه‌های سینوسی و کسینوسی گشتاور با فرکانس  $6n\omega_r$  هستند و از رابطه (۳) به دست می‌آیند. [۴]

با توجه به مطالب بیان شده، برای بهبود کیفیت ولتاژ تولیدی DFIG و نیز کاهش نوسان گشتاور، باید هارمونیک‌های ایجاد کننده مشکل با دو رویکرد بیان شده حذف شوند. در شرایطی که فرکانس تغذیه روتور از  $7/5$  هرتز بیشتر باشد، اگر هارمونیک‌های پنجم و یازدهم در طرف روتور حذف شوند، در طرف استاتور مولفه‌های با فرکانس کمتر از  $40$  هرتز وجود نخواهد داشت. اگر علاوه بر هارمونیک‌های پنجم و یازدهم، هارمونیک‌های هفتم و نهم در طرف روتور نیز حذف شوند، در طرف استاتور مولفه‌های با فرکانس کمتر از  $120$  هرتز وجود ندارد.



شکل ۵ حذف  $m$  هارمونی توسط زوایای کلیدزنی کنترل شده در مبدل نیم‌پل [۱۲]

که  $n$  مرتبه هارمونی محذوف و  $m$  تعداد هارمونی‌های محذوف انتخابی می‌باشد. بنابراین برای حذف  $m$  هارمونی دارای مرتبه‌های  $n_1, n_2, \dots, n_m$  باید رابطه (۶) برقرار باشد.

$$a = \begin{bmatrix} a_{n_1} \\ \dots \\ a_{n_m} \end{bmatrix} = 0 \quad (6)$$

که:

$$a_{n_i} = 1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos(n_i \alpha_k) \quad (7)$$

برای حل این معادلات، از روش نیوتن-رافسون استفاده می‌شود. ابتدا مقادیر اولیه برای  $\alpha_i$  ها انتخاب می‌شود.

$$\alpha^0 = [\alpha_1^0 \ \alpha_2^0 \ \dots \ \alpha_m^0]^T \quad (8)$$

حال با محاسبه ماتریس  $a^0$  و  $\left(\frac{\partial a}{\partial \alpha}\right)^0$  با توجه به رابطه (۷)، مقدار  $\Delta \alpha$  و  $\alpha^1$  به صورت روابط (۹) و (۱۰) محاسبه می‌گردند.

می‌توان با استفاده از اینورتر سه سطحی، هارمونی‌های پنجم و یازدهم تغذیه روتور را حذف نمود. همچنین برای حذف مولفه‌های با فرکانس کمتر از ۱۲۰ هرتز در طرف استاتور، می‌توان با استفاده از اینورترهای پنج سطحی، هارمونی‌های پنجم، یازدهم، هفتم و هفدهم روتور را حذف کرد.

### ۳- حذف انتخابی هارمونی‌های تغذیه روتور ژنراتور القایی دو سو تغذیه

#### ۳-۱- حذف انتخابی هارمونی با مبدل دوسطحی

در DFIG می‌توان از مبدل‌های دو سطحی مبتنی بر زوایای کلیدزنی کنترل شده، برای حذف گزینشی هارمونی‌ها بهره گرفت. مطابق شکل ۵ با استفاده از یک اینورتر نیم‌پل که دارای زوایای کلیدزنی  $\alpha_1, \alpha_2, \dots$  و  $\alpha_{2m+1}$  در یک نیم‌سیکل می‌باشد، می‌توان  $m$  هارمونی انتخابی را حذف نمود. بسط سری فوریه شکل موج نمایش داده شده در شکل ۵، دارای ضرایب  $a_n$  و  $b_n$  بوده که با فرض تقارن شکل موج نسبت به  $wt = \pi$  و  $wt = \frac{\pi}{2}$  این ضرایب به صورت روابط (۴) و (۵) استخراج می‌گردند [۱۲].

$$a_n = \frac{4}{n\pi} [1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos n \alpha_k] \quad (4)$$

$$b_n = 0 \quad (5)$$

سرعت و دقت را برآورده کند، به کارگیری معیار سطوح برابر بوده که در [۱۰] ارائه شده و دارای مراحل زیر می باشد.

۱- با استفاده از معیار سطوح برابر، زاویه  $\delta_k$  که محل تلاقی سطح  $k$  ام ولتاژ و شکل موج مرجع است مطابق رابطه (۱۲) حاصل می شود.

$$\delta_k = \arcsin(k \cdot V_{dc} + h_5 \sin(5\delta_k) + \dots + h_m \sin(m\delta_k)) \quad (12)$$

که  $h_5, \dots, h_m$  هارمونی های حذف شده انتخابی می باشند.

۲- در مرحله بعد، زوایای کلیدزنی  $\theta_k$  ها از روی مقدار  $\delta_k$  ها محاسبه می گردند.

$$\theta_k = k\delta_k - (k-1)\delta_{k-1} + V_F(\cos(\delta_k) - \cos(\delta_{k-1})) - \frac{h_5}{5}(\cos(5\delta_k) - \cos(5\delta_{k-1})) - \dots - \frac{h_m}{m}(\cos(m\delta_k) - \cos(m\delta_{k-1})) \quad (13)$$

۳- در این مرحله، محتوای هارمونیک شکل موج پلکانی ناشی از اینورترهای چند سطحی محاسبه می شود. شکل موج مدوله شده برابر شکل موج سینوسی منهای مجموع هارمونی های انتخابی از گام اول تا گام فعلی بوده و از رابطه (۱۴) به دست می آید.

$$V^* = V_F \sin(\omega t) - h_{s5} \sin(5\omega t) - \dots - h_{sm} \sin(m\omega t) \quad (14)$$

که  $V^*$  بیانگر شکل موج مدوله شده و  $h_{si}$  مجموع دامنه هارمونی  $h_i$  ام از گام اول محاسبه تا گام فعلی می باشد.

$$h_{si} = \sum_{i=1,2,\dots}^{iter} h_i \quad (15)$$

در حقیقت در هر حلقه تکرار، شکل موج مرجع، یک موج سینوسی منهای مجموع محتوای هارمونیک انتخابی ناشی از کلیدزنی بوده و با مراحل تکرار متعدد، محتوای هارمونیک انتخابی در شکل موج مرجع به صفر می گراید.

$$\Delta\alpha = \left( \left[ \frac{\partial a}{\partial \alpha} \right]^0 \right)^{-1} \times (-a^0) \quad (9)$$

$$\alpha^1 = \alpha^0 + \Delta\alpha \quad (10)$$

و با تعداد تکرار مناسب، زوایای  $\alpha_i$  ها برای حذف هارمونی های مورد نظر حاصل می گردند.

### ۳-۲ حذف انتخابی هارمونی با مبدل چند

#### سطحی

با توجه با محدودیت فرکانس کاری تریتور، حذف تعداد زیادی از هارمونی ها در اینورترهای دوسطحی امکان پذیر نیست و بهتر است از اینورترهای تریتوری چند سطحی استفاده شود. اینورترهای چند سطحی عموماً از منابع ولتاژ dc با سطوح ولتاژ یکسان تشکیل شده اند که از طریق کلیدزنی مناسب، شکل موج پلکانی مطلوب تامین می گردد. به دلیل آن که در اینورترهای چند سطحی تعداد فرمان خاموش و روشن شدن کلیدها نسبت به اینورترهای معمولی با روش کلیدزنی PWM کمتر است، تلفات کلیدزنی این مبدل ها کمتر می باشد [۱۰].

بسط سری فوریه شکل موج پلکانی ناشی از اینورترهای چند سطحی به صورت رابطه (۱۱) بیان می شود.

$$V = \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_{dc}}{m\pi} (\cos(m\theta_1) + \dots + \cos(m\theta_i) + \dots + \cos(m\theta_N)) \sin(m\omega t) \quad (11)$$

که  $N$  تعداد زوایای کلیدزنی،  $m$  مرتبه هارمونیک و  $\theta_i$  ها محل تلاقی سطوح ولتاژ dc با شکل موج مرجع می باشند. با استفاده از پنج زاویه کلیدزنی، روش حذف گزینشی هارمونی منجر به حذف  $\epsilon$  هارمونی خواهد شد که نتیجه حل دسته معادلات چند جمله ای مرتبه بالا می باشد. روش های متعددی برای حل دسته معادلات مورد نظر وجود دارد که در این بین روشی که دو پارامتر

## ۴- شبیه‌سازی

در این بخش، نقش اینورترهای دو و چند سطحی در کاهش فلیکر و نوسان گشتاور ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه، در دو حالت مجزا از شبکه و متصل به شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. در شبیه‌سازی از یک ژنراتور ۳/۵ کیلووات با مشخصات ذکر شده در جدول ۲ استفاده شده است.

جدول ۲ مشخصات ژنراتور القایی استفاده شده در شبیه‌سازی

۰/۳۳	مقاومت اسانور (اهم)
۱/۲۰	اندوکنانس براکندگی اسانور (میلی‌هانری)
۳۹/۵۰	اندوکنانس مغناطیس‌کنندگی (میلی‌هانری)
۱/۴۰	اندوکنانس براکندگی رونور (میلی‌هانری)
۰/۳۵	مقاومت رونور (اهم)
۱/۴۰	نسبت دور

در محیط Matlab/Simulink، ابتدا روتور یک ژنراتور القایی مجزا از شبکه توسط روش‌های ارائه شده تغذیه شده و با کلیدزنی مناسب اینورترها، نتایج آن‌ها با روش کلیدزنی شش مرحله‌ای مقایسه شده است. سپس ژنراتور القایی متصل به شبکه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و روش مناسب برای تغذیه روتور استخراج شده است. در انتها نیز جدول مقایسه‌ای بین دو حالت متصل به شبکه و مجزا از شبکه ارائه شده است.

### ۴-۱- ژنراتور القایی دو سو تغذیه مجزا از شبکه

شکل ۶-الف، شکل موج ولتاژ روتور ژنراتور القایی را با استفاده از مبدل دو سطحی بدون حذف هارمونی نمایش می‌دهد که با اعمال این شکل موج به روتور، FFT شکل موج ولتاژ استاتور ژنراتور القایی مشابه

شکل ۷-الف می‌باشد. زیر هارمونی‌های با فرکانس ۱۲ و ۳۶ هرتز موجود در ولتاژ استاتور، ناشی از وجود هارمونی‌های پنجم و یازدهم تغذیه روتور هستند که با توجه به شکل ۱، شدت فلیکر فراتر از حد مجاز است.

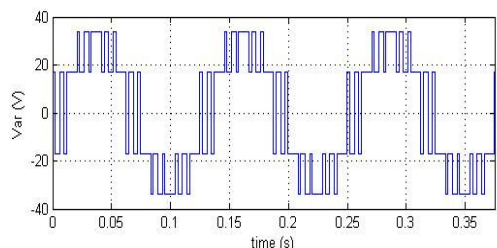
به منظور کاهش پدیده فلیکر، برای حذف زیرهارمونی‌های با فرکانس کمتر از ۴۰ هرتز طرف استاتور، باید هارمونی‌های پنجم و یازدهم تغذیه روتور حذف شوند. برای این کار، دو روش مورد استفاده قرار گرفته است. روش اول، حذف انتخابی دو هارمونی با استفاده از اینورتر دو سطحی بوده که از روش نیوتن-رافسون برای حل دسته معادلات غیر خطی جهت تعیین زوایای کلیدزنی بهره گرفته شده است. روش دوم، حذف انتخابی دو هارمونی با استفاده از اینورتر سه سطحی بوده که در آن معیار سطوح برابر جهت تعیین زوایای کلیدزنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل‌های ۶-ب و ۶-پ، شکل موج ولتاژ تغذیه روتور را به ترتیب، در حالت‌های حذف دو هارمونی با اینورتر دو سطحی و سه سطحی نمایش می‌دهند. FFT شکل موج ولتاژ استاتور ژنراتور القایی در دو حالت، مشابه شکل ۷-ب و شکل ۷-پ می‌باشد.

گرچه در هر دو روش حذف زیرهارمونی‌های با فرکانس کمتر از ۴۰ هرتز صورت می‌گیرد، اینورتر دو سطحی کم هزینه تر بوده ولی در مقابل حذف مولفه‌های با فرکانس کمتر از ۴۰ هرتز استاتور، مولفه‌های با فرکانس بیش از ۴۰ هرتز استاتور را افزایش می‌دهد. THD ولتاژ روتور در این روش در مقایسه با روش کلیدزنی شش پله‌ای بیشتر است. در مقابل، اینورتر سه سطحی فرکانس کلیدزنی و تلفات کلیدزنی کمتری داشته و علاوه بر حذف زیرهارمونی‌های با فرکانس کمتر از ۴۰ هرتز، دامنه مولفه‌های با فرکانس بیش از ۴۰ هرتز را نیز کاهش می‌دهد و بر خلاف اینورتر دو سطحی با زوایای

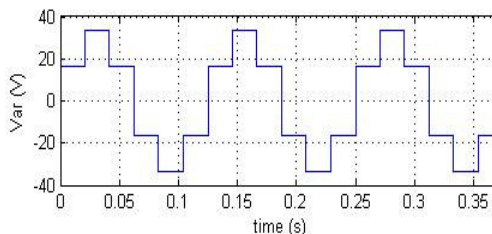


هزینه آن بیشتر می باشد.

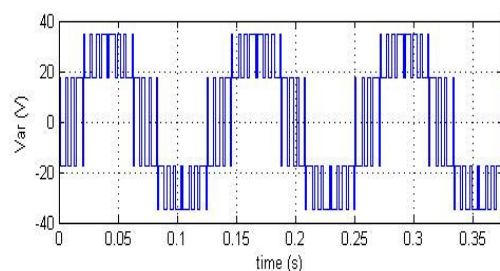
کنترل شده، مقدار THD ولتاژ روتور را کاهش می دهد ولی



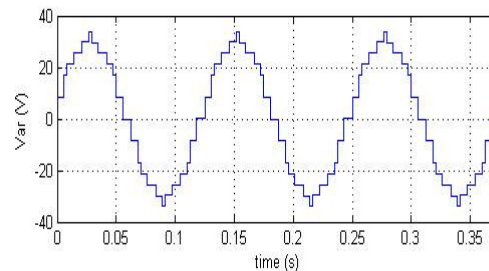
ب)



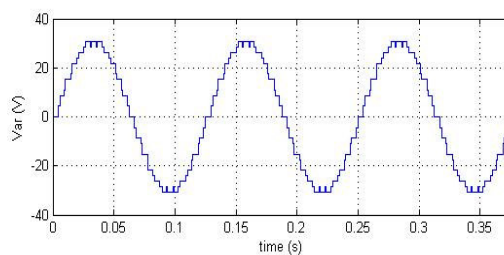
الف)



ت)



پ)

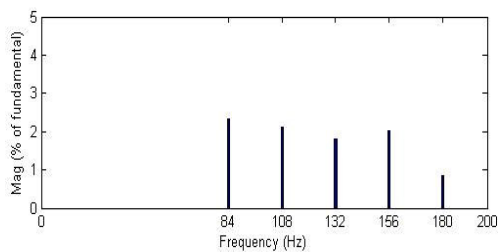


ث)

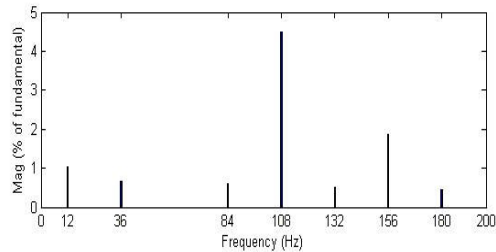
شکل ۶ شکل موج ولتاژ روتور DFIG در حالت های الف) کلیدزنی شش مرحله ای بدون حذف هارمونی ب) حذف دو هارمونی با اینورتر دو سطحی پ) حذف دو هارمونی با اینورتر سه سطحی ت) حذف چهار هارمونی با اینورتر دو سطحی ث) حذف چهار هارمونی با اینورتر پنج سطحی

حذف چهار هارمونی با اینورتر دو سطحی و پنج سطحی نمایش می دهند. FFT شکل موج ولتاژ استاتور ژنراتور القایی در دو حالت مشابه شکل ۷-ت و شکل ۷-ث می باشد. گرچه هر دو روش مولفه های با فرکانس کمتر از ۱۲۰ هرتز را حذف می کنند، در اینورتر دو سطحی THD ولتاژ روتور و فرکانس کلیدزنی و تلفات کلیدزنی بیشتر هستند ولی هزینه این نوع اینورتر کمتر می باشد.

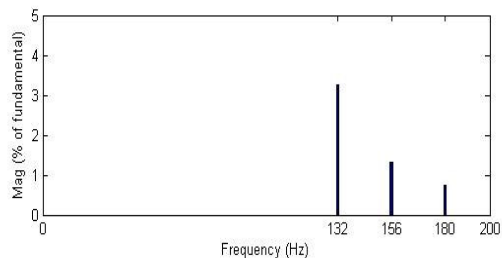
برای حذف مولفه های با فرکانس کمتر از ۱۲۰ هرتز طرف استاتور به منظور افزایش کیفیت ولتاژ، باید هارمونی های پنجم، یازدهم، هفتم و هفدهم تغذیه روتور حذف شوند. برای این کار، دو حالت اینورتر دو سطحی و اینورتر پنج سطحی برای حذف چهار هارمونی انتخابی مورد بررسی قرار گرفته که شکل ۶-ت و شکل ۶-ث، شکل موج ولتاژ تغذیه روتور را به ترتیب، در حالت های



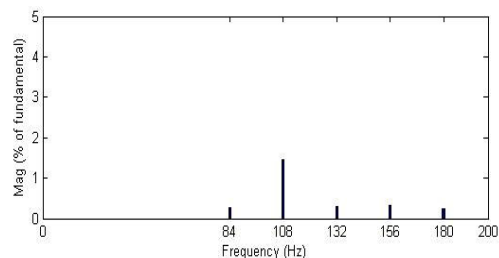
(ب)



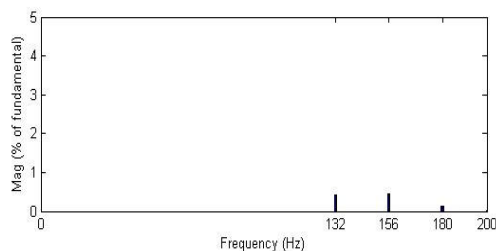
(الف)



(ت)



(پ)



(ث)

شکل ۷ طیف فرکانسی شکل موج ولتاژ استاتور DFIG مجزا از شبکه بدون در نظر گرفتن هارمونی اصلی در حالت‌های الف) کلیدزنی شش مرحله‌ای بدون حذف هارمونی ب) حذف دو هارمونی با اینورتر دو سطحی پ) حذف دو هارمونی با اینورتر سه سطحی ت) حذف چهار هارمونی با اینورتر دو سطحی ث) حذف چهار هارمونی با اینورتر پنج سطحی

شبکه (شین بی‌نهایت) و تغذیه روتور با فرکانس ۸ هرتز نشان می‌دهد.

حذف انتخابی هارمونی توسط اینورتر دو سطحی، سبب افزایش دامنه مولفه‌های حذف نشده می‌شود و با توجه به آنکه گشتاور ضربانی تابعی از کلیه مولفه‌های جریان روتور می‌باشد، می‌تواند سبب افزایش نوسان گشتاور نیز گردد. در مقابل، حذف دو یا چهار هارمونی با استفاده از اینورترهای چند سطحی باعث کاهش THD ولتاژ و جریان روتور و در نتیجه کاهش نوسان گشتاور

#### ۴-۲- ژنراتور القایی دو سو تغذیه متصل به شبکه

تاکنون DFIG در حالت مجزا از شبکه مورد بررسی قرار گرفت، در حالتی که DFIG به شبکه متصل شود، دامنه زیرهارمونی‌ها و میان‌هارمونی‌ها کاهش یافته و با افزایش سطح اتصال کوتاه شبکه در PCC، دامنه زیرهارمونی‌ها و میان‌هارمونی‌ها در محدوده مجاز قرار می‌گیرد. در شرایطی که DFIG به شبکه متصل می‌گردد، پارامتر مورد بررسی نوسان گشتاور می‌باشد. شکل ۸، گشتاور را در پنج حالت مختلف، در وضعیت متصل به

ها، علاوه بر کاهش فلیکر ولتاژ تولیدی DFIG در حالت-های مجزا و متصل به شبکه، سبب کاهش نوسان گشتاور در حالت متصل به شبکه نیز می‌گردد و از نظر پارامترهای کیفیت توان وضعیت به مراتب بهتری دارد.

### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، استفاده از مبدل‌های دو و چند سطحی برای حذف هارمونی‌های مشکل‌زای تغذیه روتور ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه پیشنهاد شده است. تحلیل هارمونی موجود در شکل موج ولتاژ استاتور مطرح شده و مشخص گردید که با کاهش فرکانس تغذیه روتور ژنراتور القایی، تعداد میان‌هارمونی‌های فرکانس پایین افزایش می‌یابد. جهت کاهش فلیکر و نوسان گشتاور در دو حالت مجزا از شبکه و متصل به شبکه، حذف هارمونی‌های مشکل‌زای تغذیه روتور مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که در حالت مجزا از شبکه، استفاده از هر دو مبدل سبب حذف هارمونی‌های انتخابی می‌گردد در حالی که مبدل دو سطحی THD را افزایش و مبدل چند سطحی THD را کاهش می‌دهد.

در حالت متصل به شبکه، استفاده از مبدل‌های دو سطحی ممکن است سبب افزایش نوسان گشتاور در مقایسه با حالت استفاده از روش کلیدزنی شش‌پله‌ای شود. بنابراین در حالت متصل به شبکه، تنها استفاده از مبدل‌های چند سطحی با زوایای کلیدزنی کنترل شده توصیه می‌گردد.

می‌گردد. در جدول ۳ مقایسه‌ای بین مقدار نوسان گشتاور و اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ و جریان تغذیه روتور در پنج حالت مختلف در وضعیت متصل به شبکه و تغذیه ۸ هرتز روتور صورت گرفته است.

جدول ۳ مقایسه نوسان گشتاور و اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ و جریان روتور در فرکانس ۸ هرتز

		الف	ب	پ	ت	ث
ژنراتور مجزا از شبکه	THD ولتاژ روتور (درصد)	۳۱/۰	۴۵/۹	۹/۸	۵۲/۵	۵/۹
	THD جریان روتور (درصد)	۵/۸	۵/۰	۱/۴	۴/۹	۰/۵
	درصد نوسان گشتاور	۳۰/۵	۲۲/۲	۶/۸	۱۷/۸	۱/۹
ژنراتور متصل به شبکه	THD ولتاژ روتور (درصد)	۳۱/۰	۴۵/۹	۹/۸	۵۲/۵	۵/۹
	THD جریان روتور (درصد)	۵۲/۶	۲۶/۱	۷/۷	۲۵/۵	۲/۲
	درصد نوسان گشتاور	۸۲/۰	۴۱/۱	۱۷/۷	۵۳	۵/۳

الف: بدون حذف هارمونی

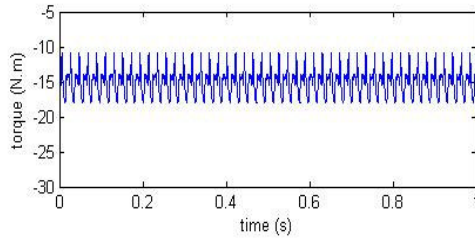
ب: حذف دو هارمونی با اینورتر دو سطحی

پ: حذف دو هارمونی با استفاده از اینورتر سه سطحی

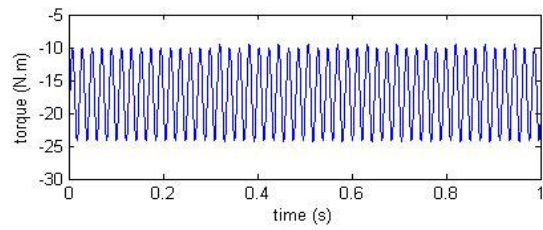
ت: حذف چهار هارمونی با اینورتر دو سطحی

ث: حذف چهار هارمونی با استفاده از اینورتر پنج سطحی

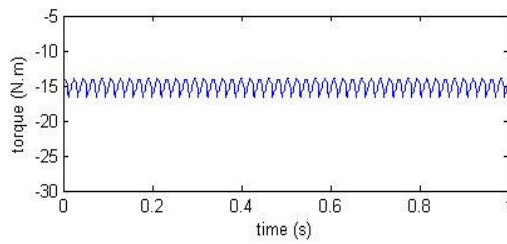
نکته جالب آن است که برای در حالت تغذیه روتور با فرکانس دیگری مثل ۱۱/۵ هرتز، استفاده از اینورتر دو سطحی در حالت متصل به شبکه سبب افزایش نوسان گشتاور می‌شود. بنابراین، گرچه استفاده از اینورتر دو سطحی برای حذف هارمونی سبب کاهش فلیکر تولیدی DFIG در حالت مجزا از شبکه می‌گردد، ولی در حالت متصل به شبکه، حذف هارمونی با استفاده از اینورتر دو سطحی ممکن است به دلیل افزایش دامنه هارمونی‌های حذف نشده سبب افزایش نوسان گشتاور شده و لذا استفاده از آن در این حالت توصیه نمی‌گردد. در مقابل، استفاده از اینورترهای چند سطحی برای حذف هارمونی-



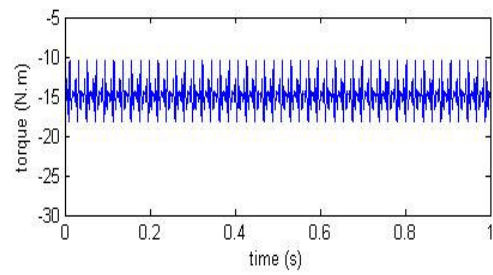
(ب)



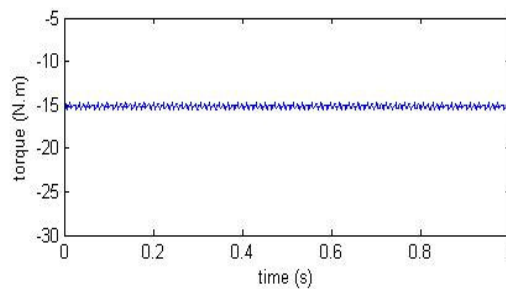
(الف)



(ت)



(پ)



(ث)

شکل ۸ گشتاور تولیدی DFIG در حالت‌های الف) کلیدزنی شش مرحله‌ای بدون حذف هارمونی ب) حذف دو هارمونی با اینورتر دو سطحی پ) حذف دو هارمونی با اینورتر سه سطحی ت) حذف چهار هارمونی با اینورتر دو سطحی ث) حذف چهار هارمونی با اینورتر پنج سطحی

*Conversion, IEEE Transactions on*; Vol. 25, No. 2, 2010, pp 356-368.

- [3] Kang Y.C., Kang H.G., Lee J.H., Zheng T.Y., Lee B.E., Park G.C.; "Protection algorithm for the windings of a doubly-fed induction generator using the d-q equivalent circuits", *Transmission & Distribution Conference & Exposition*; 2009, pp 1-4.
- [4] Lingling Fan., Yuvarajan S., Kavasseri R.; "Harmonic analysis of a DFIG for a wind energy conversion system", *Energy Conversion, IEEE Transactions on*; Vol. 25, No. 1, 2010, pp 181-190.

## ۶- منابع

- [1] Pena R., Clare J.C., Asher G.M.; "A doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters supplying an isolated load from a variable speed wind turbine", *Electric Power Applications, IEE Conference of*; Vol. 143, No. 5, 1996, pp 380-387.
- [2] Si Zhe Chen., Cheung N.C., Ka Chung Wong., Jie Wu.; "Integral sliding-mode direct torque control of doubly-fed induction generators under unbalanced grid voltage", *Energy*

- [9] “IEEE recommended practice for measurement and limits of voltage fluctuations and associated light flicker on AC power systems”, IEEE Std 1453-2004 (Adoption of CEI/IEC 61000-4-15:1997+A1:2003) , 2005, pp 0\_1.
- [10] Jin Wang., Ahmadi D.; “A precise and practical harmonic elimination method for multilevel inverters”, *Industry Applications, IEEE Transactions on*; Vol. 46, No.2, 2010, pp 857-865.
- [11] Murphy J., Turnbull F.; *Power Electronics Control of AC Motors*, New York, Pergamon, 1988.
- [12] Patel H., Hoft R.; “Generalized techniques of harmonic elimination and voltage control in thyristor inverters: Part I--Harmonic Elimination”, *Industry Applications, IEEE Transactions on*; Vol. IA-9, No.3, 1973, pp 310-317.
- [5] Kiani M., Wei-Jen Lee.; “Effects of voltage unbalance and system harmonics on the performance of doubly fed induction wind generators”, *Industry Applications, IEEE Transactions on*; Vol. 46, No. 2, 2010, pp 562-568.
- [6] Testa A., Langella R.; “Power system subharmonics”, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*; Vol. 3, 2005, pp 2237- 2242.
- [7] Gunther E.W., “Interharmonics- recommended updates to IEEE 519,” in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting*; Vol. 2, 2002, pp 950-954
- [8] Halpin S., Singhvi V., “Limits for interharmonics in the 1-100-Hz range based on lamp flicker considerations”, *Power Delivery, IEEE Transactions on*; Vol. 22, No.1, 2007, pp 270-276.