

## بهبود کنترل توان اکتیو و راکتیو شبکه در توربین بادی DFIG

محمد یزدخواستی<sup>۱</sup>، دکتر بهادر فانی<sup>۲</sup>

۱ دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان، mohammad.yazdekhashti@gmail.com

۲ دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، bahador.fani@gmail.com

چکیده - امروزه استفاده از سیستم های مبتنی بر انرژی باد گسترش چشمگیری پیدا کرده است. یکی از پرکاربردترین آن ها سیستم بادی با ژنراتور القایی دوسو تغذیه می باشد. در این سیستم ژنراتور متصل گردیده به شبکه از سیستم کنترلی تک سیکلی برای کنترل مبدل خود استفاده کرده است. مبدل سمت ژنراتور، سرعت ژنراتور را تنظیم می کند و مبدل سمت شبکه، توان راکتیو را کنترل می نماید. روش کنترلی پیشنهادی بر روی یک شبکه، شبیه سازی شده است. هدف، بهبود کنترل توان اکتیو ورودی به ژنراتور و نیز کنترل توان راکتیو باس بار سمت ترمینال ژنراتور با یک کنترل کننده تک جهته (تک سیکلی) تحت حالت های تغییر بار، اعمال خطا و همچنین بارهای نامتقارن از قبیل بار غیرخطی است. نتایج شبیه سازی، توانایی استراتژی کنترل را نشان می دهد.

کلید واژه - هارمونیک، مبدل پشت به پشت، ژنراتور القایی دوسو تغذیه، بار غیرخطی، خطای تک فاز.

۲- ماشین آسنکرون

۱- مقدمه

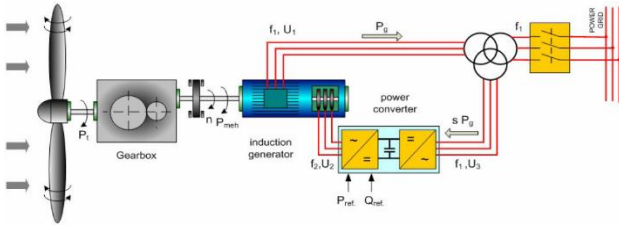
استفاده از ژنراتورهای القایی (آسنکرون) در سیستم های تبدیل انرژی باد، به دلیل ارزانی، استحکام و نیاز کم آن ها به نگهداری در حال افزایش است [2]. از مهمترین مزیت های این ژنراتورها، می توان به پایداری، ساختمان مکانیکی ساده و تولید انبوه با قیمت پایین اشاره کرد. در سال های اخیر توربین های بادی با تغذیه دوپل (DFIG)<sup>۲</sup> بسیار مورد توجه سازندگان قرار گرفته اند. متغیر بودن سرعت آن ها، این قابلیت را ایجاد می کند که توربین بتواند در محدوده وسیع تری از وزش باد در راندمان ماکزیمم خود کار کند [3]. از مزیت دیگر DFIG می توان به جذب نوسانات باد با تغییر سرعت چرخش روتور و عدم انتقال آن ها به شبکه اشاره کرد. بخش کنترلی یک سیستم بادی از جمله با اهمیت ترین قسمت موجود در سیستم جهت دریافت بهترین راندمان، بشمار می آید. بیشتر روش هایی که تاکنون معرفی شده است، علاوه بر مزایای ارائه شده، معایبی نیز داشته اند. از جمله این روش های، می توان به روش مدولاسیون پهنای پالس (PWM) که یک روش کنترلی خطی است، اشاره کرد. روش های دیگری مانند

گسترش استفاده از منابع انرژی های تجدیدپذیر به سبب سازگاری با محیط زیست و دسترسی راحت و کم هزینه آن ها است [1]. استفاده از انرژی باد در بسیاری از کشورهای جهان، رو به فزونی گذاشته است. باد یکی از مهمترین منابع انرژی تجدیدپذیر می باشد که از دیر باز ذهن بشر را به خود معطوف کرده است. در شرایط کنونی با توجه به توجیه پذیری اقتصادی انرژی باد در مقایسه با سایر منابع انرژی های نو، بهره گیری از انرژی باد مورد توجه جدی قرار گرفته است که کشور ایران نیز از این قاعده مستثنی نیست. بطور کلی، یک توربین بادی می تواند به انواع ژنراتورهای سه فاز متصل شود. امروزه نیاز به ایجاد یک جریان الکتریکی سازگار با شبکه، توسط مبدل های فرکانسی متصل به شبکه قابل حل است، حتی اگر جریان ها به دو صورت متناوب در فرکانس متغیر و یا جریان بصورت مستقیم (DC) باشد. ژنراتورهای متداول مورد استفاده در توربین بادی عبارتند از:

۱- ماشین سنکرون<sup>۱</sup>

<sup>۲</sup> - Double Fed Induction Generator

<sup>۱</sup> - Synchronous machine



شکل (۱): ژنراتور DFIG متصل به مبدل پشت به پشت

## ۲-۲- مدل توربین بادی

معادلات توربین بادی به شکل زیر است:

$$P_{wt} = \frac{1}{2} A_{wt} C_p(\lambda, \beta) v_{\omega}^3 \quad (1)$$

در معادله فوق  $C_p(\lambda, \beta)$  ضریب توان است. ضریب توان تابعی از زاویه پیش‌پره‌ها ( $\beta$ ) و نسبت سرعت خطی نوک پره به سرعت باد ( $\lambda$ ) است که از رابطه زیر قابل تعریف است.

$$\lambda = \frac{\omega_{turb} R}{V_{wind}} \quad (2)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \beta^5 - c_6 \right) \exp\left(\frac{c_7}{\lambda_i}\right) \quad (3)$$

$$\lambda_i = \left[ \left( \frac{1}{\lambda + c_8 \beta} \right) - \left( \frac{c_9}{\beta^3 + 1} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

در رابطه فوق  $c_1$  تا  $c_9$  با توجه به اطلاعات تولیدکنندگان به منظور شبیه سازی ضریب توان تعیین می شوند. می توان وگشتاور مکانیکی بصورت زیر به دست می آید:

$$P_{Mech} = C_p P_{WIND} \quad (5)$$

$$T_{Mech} = \frac{P_{Mech}}{\omega_{turb}} \quad (6)$$

زمانی که توربین انرژی از باد می گیرد سرعت باد کم خواهد شد که این خود باعث جدا شدن توربین از مسیر باد می شود. آلبرت بتز<sup>۴</sup> فیزیکدان آلمانی در ۱۹۱۹ اثبات کرد که یک توربین حداکثر می تواند ۵۹ درصد از انرژی بادی که در مسیر آن می وزد را

SPWM، Programmed PWM وجود دارند که زیرشاخه مدولاسیون PWM هستند [4,5]. در مرجع [6] از روش کنترل مد جریان که از جمله روش های پرکاربرد در کنترل سیستم بادی بوده، استفاده شده است.

روش های کنترلی دیگری نیز مانند SVM و MRAS نیز استفاده شده است که البته کاربرد کمتری نسبت به PWM دارد [7,8]. به روش های مختلفی برای کنترل سیستم بادی اشاره شد. در ادامه مقاله در بخش ۲ مدل سیستم بادی با استفاده از DFIG آورده شده است، در بخش (۱-۲) ساختار یک نیروگاه بادی تشریح شده است، در بخش (۲-۲) مدل توربین بادی مورد بررسی قرار می گیرد، در بخش (۳-۲) مدل ژنراتور DFIG بیان گردیده است، در بخش ۳ کنترل کننده تک سیگلی توضیح داده شده است، بخش ۴ نتایج شبیه سازی توسط نرم افزار MATLAB بیان گردید و همچنین مقایسه ای بین بهبود توان اکتیو و راکتیو نسبت به روش کنترلی مرسوم PWM انجام گردید و سرانجام در بخش آخر، نتیجه گیری از روش پیشنهادی آورده شده است.

## ۲- مدل سیستم توربین بادی با استفاده از DFIG

### ۱-۲- ساختار نیروگاه بادی

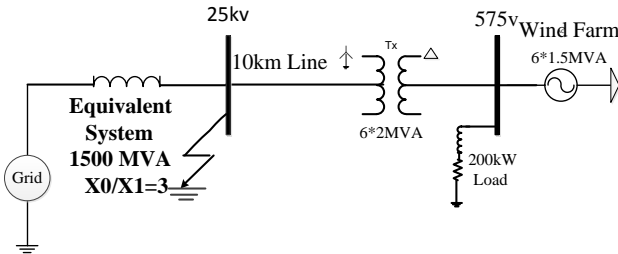
همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، ساختار یک نیروگاه بادی بصورتی طراحی می شود که مدار استاتور DFIG بطور مستقیم و مدار روتور آن توسط یک مبدل پشت به پشت<sup>۲</sup> (مبدل سمت ژنراتور و مبدل سمت شبکه) با حلقه های لغزان به شبکه متصل می گردد. بین دو مبدل یک خازن که اصطلاحاً به آن لینک dc گفته می شود قرار می گیرد. این خازن بعنوان ذخیره کننده انرژی و به منظور ثابت نگاه داشتن تغییرات ولتاژ (ریپل ولتاژ) بکار می رود. در شرایط عملکرد عادی، DFIG از طریق مبدل سمت شبکه می تواند بطور مستقل از هم، توان اکتیو و راکتیو مورد نیاز را در سیستم کنترل نماید [9,10]. در این مقاله روش کنترلی موسوم به کنترل تک سیگلی [11,12]، بر روی ژنراتور القایی دوسو تغذیه پیاده سازی شده است.

<sup>۴</sup> -Betz

<sup>۲</sup> - Back To Back Converter

استخراج کند و به این ترتیب  $C_{P_{Bet z}}$  در معادله زیر هرگز بیشتر از ۰.۵۹ نخواهد شد.

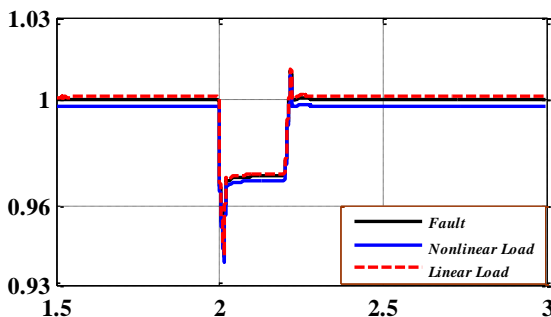
$$P_{Bet z} = \frac{1}{2} \rho AV^3 C_{P_{Bet z}} \quad (7)$$



شکل (۳): شماتیک تک فاز یک مزرعه بادی

همانطور که در شکل (۳) قابل مشاهده است سیستم شبیه سازی شده به شبکه توزیع ۲۵ کیلو ولت متصل شده است. پارامترهای مربوط به ژنراتور و خط انتقال در بخش ضمیمه آورده شده است. مقداری از توان تولیدی توسط توربین ها به مصرف بار موجود در شبکه یعنی یک بار ۲۰۰ KW در باس ۵۷۵ ولت (B575) می رسد و الباقی توان تولیدی نیز از طریق یک فیدر ۲۵ KV به طول ۱۰ Km به یک منبع با ولتاژ ثابت (باس بار بینهایت) منتقل می شود. نقش این منبع تامین توان مورد نیاز مصرف کنندگان در صورت کاهش تولید توربین ها است. در این شبیه سازی هدف تعریف شده برای بهینه سازی، زمان بازیابی ولتاژ به حالت اولیه پس از اعمال تغییرات (اضافه بار خطی و غیر خطی، خطا) بوده است.

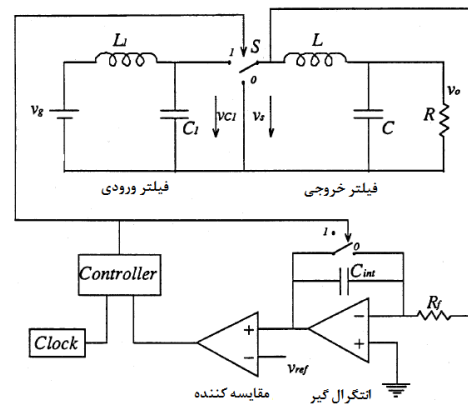
همانطور که در شکل (۴) مشخص است، عملکرد کنترل کننده با انتخاب پارامترهای بدست آمده در حالت افزایش بار با رنگ قرمز نشان داده شده به بهینه پارامترهای تخمین زده و به دو حالت دیگر (بار غیر خطی و خطا) نزدیک تر است، بنابراین می توان پارامترهای  $K_i$  و  $K_p$  این حالت را بجای شرایط خطا و افزایش بار غیر خطی نیز در نظر گرفت.



شکل (۴) - الف)

### ۳- عملکرد کنترل کننده تک سیکلی

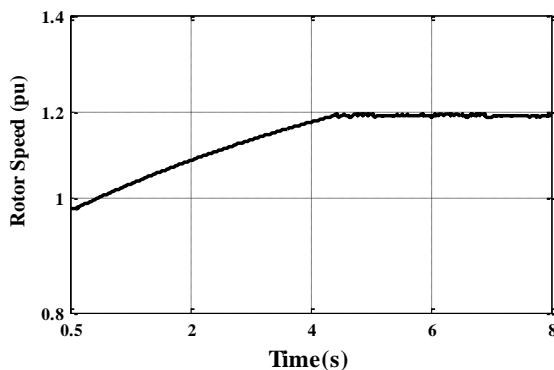
مهمترین وظیفه کنترل کننده به کار برده شده در این مقاله کنترل مبدل سمت ژنراتور جهت کنترل توان راکتیو مورد نیاز شبکه است. این کار توسط کنترل ولتاژ ترمینال ژنراتور، و با فرمان دادن به مبدل سمت شبکه صورت می پذیرد. همانطور که در شکل (۲) جزئیات آن قابل مشاهده است، ولتاژ سمت باس ژنراتور نمونه برداری می شود. با کنترل ولتاژ مذکور، میزان تبادل توان راکتیو به شبکه نیز کنترل می شود.



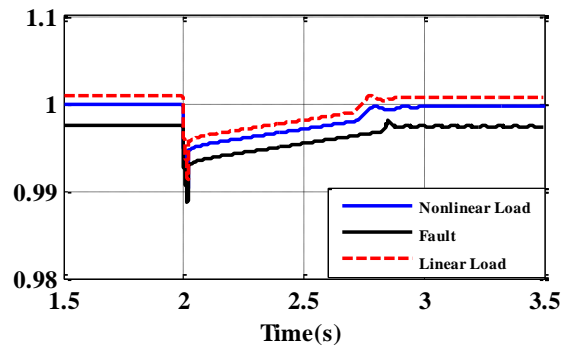
شکل (۲): مدار کنترلی تک سیکلی در مبدل سمت شبکه

### ۴- نتایج شبیه سازی

#### ۴-۱- شماتیک تک فاز سیستم بادی



شکل (۵): سرعت روتور کنترل شده با تک سیکلی



شکل (۴) - (ب)

شکل (۴): مقایسه ولتاژ باس ژنراتور با  $K_p$  و  $K_i$  سه حالت مختلف در شرایط (الف) اعمال خطا، (ب) افزایش بار غیر خطی

همانطور که در شکل فوق مشخص شده است، سرعت ژنراتور با سرعت پس از گذشت  $0.6$  ثانیه به مقدار ۱ پریونیت می‌رسد (از زیر مقدار نامی به مقدار نامی). پس از مدتی در حدود  $4/5$  ثانیه در مقدار مورد نظر یعنی  $1/2$  پریونیت (از مقدار نامی به بالاتر از مقدار نامی) قرار می‌گیرد و در همان محدوده با نوسانی اندک که ناشی از تغییرات سرعت باد ورودی به توربین است، ثابت می‌شود.

در شکل‌های فوق خط آبی رنگ توسط بهینه پارامتر موجود در هر مرحله از شبیه‌سازی ایجاد شده است. مشاهده می‌شود که این خط که بیانگر سطح ولتاژ باس ژنراتور است دقیقاً در مقدار مورد نظر ( $1 \text{ pu}$ ) در زمان اعمال خطا و یا افزایش بار غیر خطی ( $2$  ثانیه) قرار می‌گیرد.

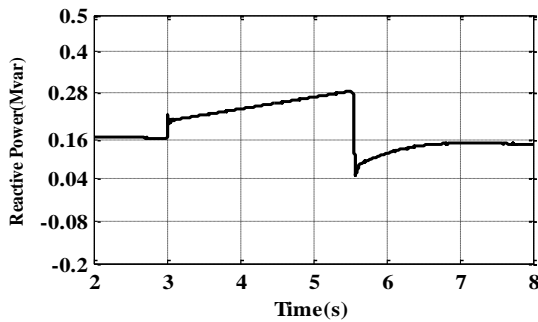
#### ۲-۴- کنترل سرعت ژنراتور سیستم

سرعت روتور ژنراتور از عوامل موثر در توان خروجی توربین بادی است که بصورت مستقیم در آن اثر می‌گذارد. بنابراین کنترل و تثبیت آن در مقدار معین، همواره از اهداف مهم در سیستم بادی بشمار می‌آید. این کار توسط مبدل سمت ژنراتور انجام می‌شود که با کنترل آن توسط روش تک‌سیکلی می‌توان سرعت را در مقدار مورد نیاز که در این شبیه‌سازی در حدود  $1/2$  پریونیت است ثابت نگاه داشت.

#### ۲-۴- کنترل توان اکتیو سیستم

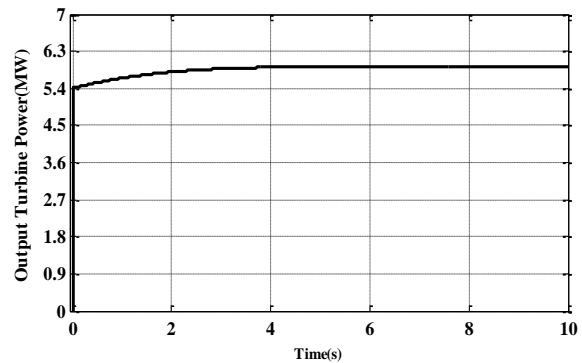
با توجه به مشخصه توان خروجی به سرعت ژنراتور و با کنترل سرعت ژنراتور در مقدار  $1/2$  پریونیت مقدار توان خروجی توربین طبق انتظار برابر  $5/95$  مگاوات می‌شود که در شکل (۸) نشان داده شده است.

در شکل (۵) حالت ماندگار سرعت روتور کنترل شده با روش تک‌سیکلی نشان داده شده است.



(ب)

شکل (۷): عملکرد کنترل کننده در حین افزایش بار  
(الف) دامنه ولتاژ شین ژنراتور، (ب) توان راکتیو شبکه



شکل (۶): توان اکتیو خروجی از توربین بادی

### ۳-۴- کنترل توان راکتیو سیستم

در این بخش کنترل توان راکتیو با توجه به جبران افت ولتاژ باس سمت ژنراتور تحت عوامل زیر را مورد بررسی قرار می دهیم.

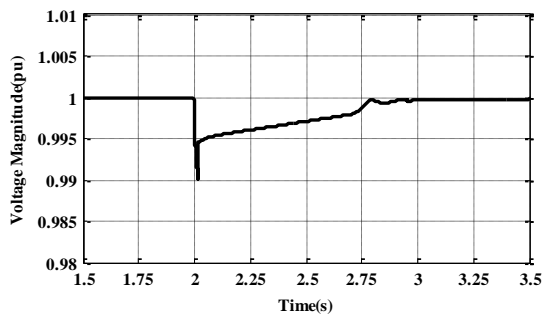
### ۴-۳-۲- افزایش بار غیر خطی

در شکل (۸) عملکرد کنترل کننده تحت افزایش بار غیر خطی نشان داده شده است.

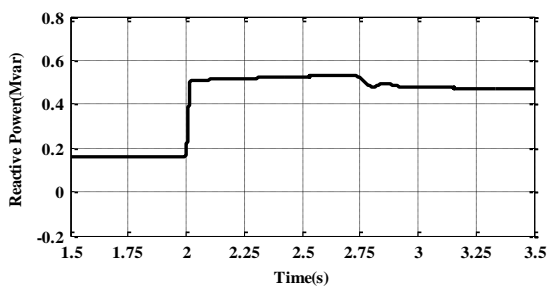
### ۴-۳-۱- افزایش بار

در شکل (۷) عملکرد کنترل کننده تحت افزایش بار خطی نشان داده شده است. در این بخش کنترل کننده تک سیگلی به کنترل ولتاژ باس  $575V$  که بار محلی شبکه نیز به آن متصل شده است، می پردازد. در زمان ۳ ثانیه یک بار خطی (RL) بطور موازی با بار اولیه ( $200KW$ ) اضافه می شود و سبب افت ولتاژ در باس سمت ژنراتور می شود. بطور کلی پایداری ولتاژ، توسط کنترل توان راکتیو در شبکه انجام می شود.

همانطور که در شکل (۷-ب) مشاهده می شود مثبت بودن توان راکتیو، نشان دهنده تزریق توان به شبکه و منفی بودن آن بیانگر جذب توان راکتیو از شبکه است. با مشاهده شکل (۷) می بینیم که کنترل کننده تک سیگلی بخوبی توانسته افت ولتاژ ناشی از افزایش بار را با کنترل و تزریق توان راکتیو به شبکه جبران نماید.

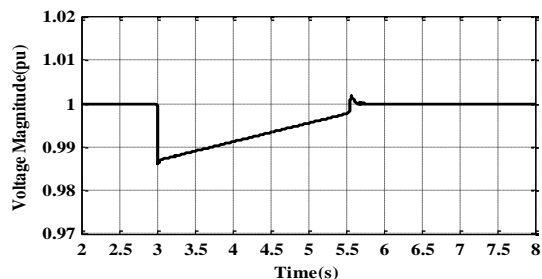


(الف)



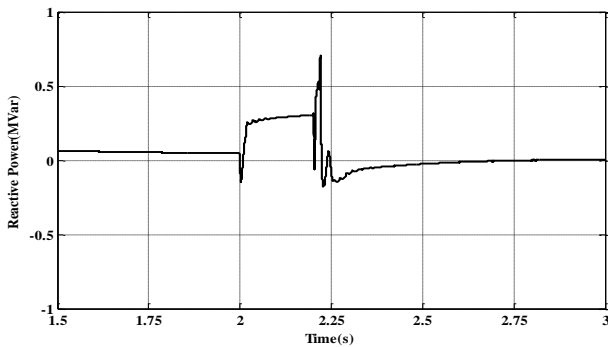
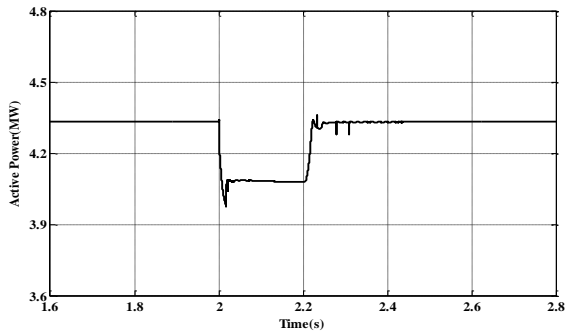
(ب)

شکل (۸): عملکرد کنترل کننده در حین افزایش بار غیر خطی  
(الف) دامنه ولتاژ شین ژنراتور، (ب) توان راکتیو شبکه



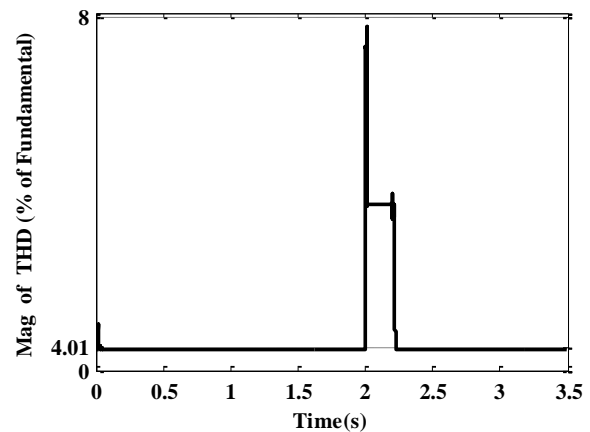
(الف)

بارهای غیر خطی در مدارهای AC باعث ایجاد جریان های هارمونیک در کنار جریان اصلی AC می شوند. پس از اضافه شدن یک بار غیر خطی (پل سه فاز دیودی موازی با بار مقاومتی) به باس  $575V$  در زمان ۲ ثانیه ولتاژ از مقدار مورد نظر ( $1 pu$ ) به اندازه ۱٪ افت می کند. البته



شکل (۱۰): عملکرد کنترل کننده تحت خطا

این افت ولتاژ همراه با تزریق جریان هارمونیکی به شبکه است. همانطور که دیده می شود کنترل کننده تک سیکلی پس از مدت زمانی در حدود ۱/۱۵ ثانیه ولتاژ را به مقدار اولیه باز می گرداند که نشان دهنده عدم تاثیر هارمونیک در عملکرد کنترل کننده پیشنهادی است. در شکل (۹) تغییرات ضریب اعوجاج هارمونیکی (THD<sup>۵</sup>) ولتاژ باس متصل به بار غیر خطی نشان داده شده است.



شکل (۹): ضریب اعوجاج هارمونیکی ولتاژ تحت بار غیر خطی

با مشاهده شکل (۱۰) به این نتیجه استنباط می شود که، دامنه ولتاژ سمت باس ژنراتور و توان راکتیو مبادله شده به شبکه دارای نوسانی کمتر است.

#### ۴-۴- مقایسه کنترل کننده تک سیکلی با PWM

در شکل (۱۱) مقایسه ای بین روش تک سیکلی با روش معمول مانند PWM انجام گردید و به تفکیک بهبود کنترل توان اکتیو و راکتیو را در این روش بیان می کنیم.

همانطور که در شکل (۹) مشخص است THD قبل از اضافه شدن بار غیر خطی در حدود ۴/۰۱ (به علت فرایند غیر خطی بودن سوئیچ زنی مبدل و نوسان اندک باد) است. پس از اضافه شدن بار تا حدود ۸ افزایش می یابد و سرانجام کنترل کننده تک سیکلی بخوبی THD را به مقدار ۴/۰۸ باز می گرداند. بنابراین کنترل کننده مذکور توانسته مانند یک فیلتر اکتیو هارمونیک ایجاد شده توسط بار غیر خطی را حذف نماید.

#### ۴-۳-۳- اعمال خطا

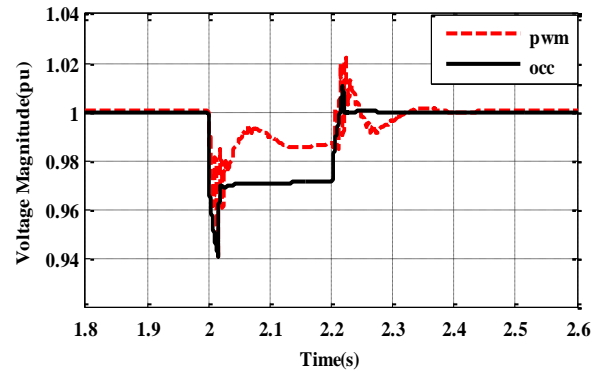
در شکل (۱۰) عملکرد کنترل کننده تحت خطای سه فاز نشان داده شده است. هنگامی که خطای سه فاز به شبکه اعمال می شود یک افت ناگهانی در ولتاژ سمت ژنراتور ایجاد می شود. در این زمان کنترل کننده پیشنهادی به منظور بازگردانی ولتاژ به مقدار اولیه خود وارد عمل می شود.

<sup>۵</sup> - Total Harmonic Distortion

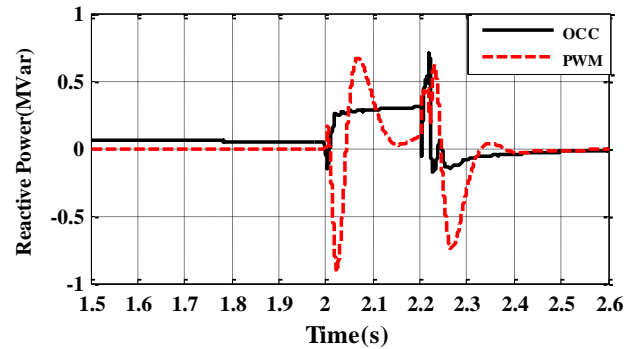
دینامیکی از خود نشان می دهد که این بدلیل تاخیر کمتر این روش میان سیگنال مرجع و خروجی نسبت به روش PWM است.  
-عمومیت کنترل تک سیکلی جهت کنترل انواع شکل موج ها از قبیل DC و AC و حتی شکل موج های نامشخص نسبت به روش PWM بیشتر است

### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله چگونگی کنترل توان اکتیو و راکتیو یک توربین بادی دو سو تغذیه DFIG نشان داده شد و به منظور کنترل مبدل های موجود در آن از روش کنترل کننده جدیدی به ترتیب بر روی مبدل سمت شبکه (کنترل توان راکتیو) و مبدل سمت ژنراتور (کنترل سرعت ژنراتور) استفاده گردید. هدف، کنترل توان ورودی به ژنراتور توسط کنترل سرعت ژنراتور (طبق الگوریتم MPPT) و کنترل توان راکتیو شبکه با کنترل ولتاژ باس بار ژنراتور در شرایط اضافه بار، خطا و بارهای غیرخطی به شبکه، توسط کنترل تک سیکلی بوده است. با بررسی نتایج شبیه سازی توانایی این روش کنترلی جهت کنترل توان اکتیو و راکتیو شبکه و همچنین حذف هارمونیک ناشی از حضور بار غیرخطی نشان داده شد.



(الف)



(ب)

شکل (۱۱): مقایسه ای بین روش تک سیکلی با روش PWM

(الف) دامنه ولتاژ شین ژنراتور، (ب) توان راکتیو شبکه

### مراجع

1. Harini. C, Kumari. NK, Raju. GS, "Analysis of wind turbine driven doubly fed induction generator", in Electrical Energy Systems (ICEES), 2011.
2. Chen. WL, Hsu, "Controller Design for an Induction Generator Driven by a Variable-Speed Wind Turbine", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21. No. 3, pp.625-635, 2006.
3. Gautam. D, Vittal. V, Harbour. T, "Impact of Increased Penetration of DFIG-Based Wind Turbine Generators on Transient and Small Signal Stability of Power Systems", IEEE Transactions on Energy Society, Vol. 24. No. 3, pp.1426-1434, 2009.
4. Kazmierkowski. M. P, Malesani. L, "Current control techniques for Three-phase voltage-source PWM converters a survey", IEEE Transactions on Industry Electronics, Vol.45, No.5, pp.691-703, 1998.
5. Cheng. L, "Coordinated Control of Dual PWM Converters for VSCF Wind Energy Generation", Master Thesis. Chinese Electric Institute, Apr. 2004.
6. Desich. C.W, "Simple Switching Control Method Changes Power Converter into a Current Source", in IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp.300-306, 1978.
7. Forchetti. D, Garcia. G, Valla. M.I, "Vector control strategy for a doubly-fed standalone induction generator", in Proceedings of 28th Annual Conference of the IEEE Transactions on Industry Electronics Society (IECON'02), No. 2, pp.991-995, 2001.

با بررسی دقیق دو روش خواهیم فهمید که:

مولفه ای اصلی روش تک سیکلی بر پایه یک انتگرالگیر و یک مقایسه کننده استوار است.

در روش تک سیکلی متغیر سوئیچ با سیگنال مرجع در یک سیکل برابر می شود در حالی که در PWM متغیر سوئیچ با سیگنال ورودی کل دوره برابر می گردد. بنابراین شکل موج خروجی در روش تک سیکلی به مقدار مورد نظر کنترل نزدیکتر است.

بطور کلی می توان مقایسه دو روش را در قالب سه بخش کلی دسته بندی کنیم:

- کنترل تک سیکلی از نظر کیفیت شکل موج بهتر از کنترل PWM عمل می کند. همچنین قابلیت جلوگیری از هارمونیک های ناخواسته نسبت به روش PWM را دارد که این کار سبب نزدیکتر شدن مقدار خروجی به مرجع کنترل می شود.

- کنترل تک سیکلی در دنبال کردن شکل موج حالت گذرا نیز نسبت به کنترل PWM بهتر عمل می کند و در نتیجه عملکرد بهتری را در پاسخ

8. Cardenas. R, Pena. R, Clare. J, Asher. G, and Proboste. J, "MRAS Observers for Sensorless Control of Doubly-Fed Induction Generators", IEEE Transactions on Industry Electronics, Vol. 23, No. 3, pp.1075–1084, 2008.
9. Yanhua. L, Zhang. Xu, Zhao, Dongmei. M, "Research on the Wind Farm Reactive Power Compensation Capacity and Control Target", in Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), pp.1-5, 2011.
10. راکتیو و توانهای اکتیو مستقل کنترل " طاریمرادی هادی لسانی، سعید المللی بین کنفرانس " شبکه به دو بل متصل تغذیه با القایی ژنراتورهای در تهران. 1381 برق
11. Lock. A.S, da Silva. E, Elbuluk. M.E, Jacobina. C.B, "A clamping current control technique, based on one cycle control OCC", in IEEE Power Electronics Specialists Conference, Record, pp.319 – 325, 2009.
12. Femia. N, Fortunato. M, "Dynamic model of one-cycle control for converters operating in continuous and discontinuous conduction modes", in International Journal of Circuit Theory and Applications, Vol. 37. No. 5, pp.661–686, 2013