

## بررسی پدیده فیلیکر ولتاژ بارهای نوسانی در واحد توربین بادی شبکه توزیع برق سرعین

جواد بهکش

شرکت توزیع نیروی برق استان اردبیل

اردبیل، ایران

jj3307@gmail.com

نادر بدلی باروق

شرکت توزیع نیروی برق استان اردبیل

اردبیل، ایران

n\_badali89@yahoo.com

### ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از منابع تولید پراکنده مانند سیستم‌های خورشیدی و توربین‌های بادی مورد توجه قرار گرفته است [۲،۱]. توسعه استفاده از منابع تولید پراکنده مانند نیروگاه‌های بادی در کشور ایران نیز طی چند سال اخیر رشد چشمگیری داشته است. در چند سال اخیر توربین‌های بادی با توان‌های بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلوواتی در شهرهای مختلفی نصب و مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. از جمله این توربین‌ها می‌توان به توربین بادی متصل به شبکه با قدرت ۶۶۰ کیلوواتی در شهرستان سرعین اشاره کرد. ژنراتور این توربین از نوع ژنراتور القایی قفس سنجابی که عمدتاً مصرف کننده توان راکتیو است [۱۲،۳]. مشخصات ژنراتور توربین بادی شهرستان سرعین در جدول (۱) بیان شده است.

در این مقاله سعی شده است که با استفاده از سیستم اطلاعات موقعیت جغرافیایی شهرستان سرعین مدل شبکه توزیع با حضور توربین بادی در نرم‌افزار Matlab/Simulink شبیه‌سازی و تحلیل گردد. جهت جلوگیری از افت ولتاژ و کنترل توان راکتیو، جبران‌ساز استاتیکی سنکرون با ولتاژ شبکه پیشنهاد گردیده است. در نهایت جهت بررسی اثرات فیلیکر در حضور منابع تولید پراکنده، بار نوسانی (مانند قوس کوره‌ای القایی) با دامنه تغییرات ولتاژ ۵Hz به سیستم توزیع اضافه خواهد گردید. مدل فیلیکر متر با استاندارد IEC6100-4-15 طراحی شده است. نتایج نشان می‌دهد که جبران‌ساز استاتیکی سنکرون با ولتاژ شبکه باعث بهبود میزان فیلیکر شبکه توزیع در حضور بارهای نوسانی (مانند بار قوس کوره‌ای) گردیده است.

چکیده — امروزه استفاده از منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع گسترش روزافزونی داشته است. انرژی باد یکی از محبوبترین منابع تولید پراکنده بحساب می‌آید. به عنوان نمونه اکنون یک دستگاه توربین بادی ۶۶۰ کیلوواتی در شبکه توزیع برق سرعین در حال بهره‌برداری می‌باشد. از مشکلات اساسی توربین‌های بادی نسل اول عدم توانایی سیستم کنترلی جهت تنظیم ولتاژ در نقطه اتصال به شبکه (PCC)، کنترل توان راکتیو و اصلاح ضریب توان می‌باشد. از اینرو استفاده از سیستم‌های جبران‌ساز استاتیکی سنکرون با شبکه (D-Statcom) ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله با استفاده از سیستم اطلاعات موقعیت جغرافیایی (GIS) شهرستان سرعین مدل شبکه توزیع با حضور توربین بادی و بارهای نوسانی (مانند یک کارگاه قوس کوره‌ای) در نرم‌افزار Matlab/Simulink شبیه‌سازی و سپس جهت جبران توان راکتیو و تنظیم ولتاژ در نقطه اتصال به شبکه، جبران‌ساز استاتیکی سنکرون طراحی و تحلیل خواهد گردید. سیستم‌های کنترلی شبکه برق به دلیل پیچیدگی، غیرخطی، متغیر با زمان و ابعاد بینهایت ناشناخته با روشهای متعارف قابل تحلیل نمی‌باشند، فلذا برای کنترل دقیق جبران‌ساز استاتیکی سنکرون از کنترل فازی ممدانی به کمک ضریب نامتعادلی ولتاژ با ماتریس پایگاه قوانین [۷\*۷] استفاده شده است. مدل فیلیکر متر جهت مشاهده فیلیکر حاصل از بار قوس کوره‌ای با مشخصات استاندارد IEC6100-4-15 طراحی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که میزان فیلیکر شبکه در حضور جبران‌ساز استاتیکی بهبود یافته است.

واژه‌های کلیدی — فیلیکر؛ جبران‌ساز استاتیکی سنکرون؛ کنترل فازی ممدانی؛

بارهای نوسانی

متنابوب با فرکانس شبکه هستند. این سیگنالها برای کنترل سیستم جبران ساز مناسب نمی باشند. با استفاده از مد کنترلی حلقه بسته فازی، سرعت زاویه ای  $(\omega)$  در قاب مرجع  $dq$  با فرکانس زاویه ای  $(\omega_0)$  مطابقت یافته و سپس متغیرهای کنترلی با ولتاژ شبکه سنکرون و به مبدل استاتیکی جبران ساز اعمال می شوند. ولتاژ و جریان اندازه گیری شده در نقطه (PCC) توسط معادلات پارک به محور  $dq$  در قاب مرجع گردان تبدیل می شود [۴،۹].

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

ولتاژ بین شبکه و جبران ساز در محور  $dq$  عبارت است:

$$\begin{aligned} L \frac{di_d}{dt} &= -Ri_d + L\omega i_q - v_{sd} \\ L \frac{di_q}{dt} &= -Ri_q + L\omega i_d - v_{sq} \end{aligned} \quad (2)$$

که  $R, L$  میزان مقاومت و راکتانس معادل بین شبکه و جبران ساز استاتیکی است.  $i_d, i_q$  جریان و  $v_{sd}, v_{sq}$  ولتاژ شبکه در محور  $dq$  می باشند. زاویه شبکه  $\omega t$  از طریق یک مد کنترلی حلقه بسته فازی (PLL) محاسبه می گردد.  $v_d, v_q, i_d, i_q$  همگی متغیرهای ثابتی هستند که با یک کنترل کننده انتگرالی مناسب (PI) و یا کنترل فازی قابل کنترل هستند.

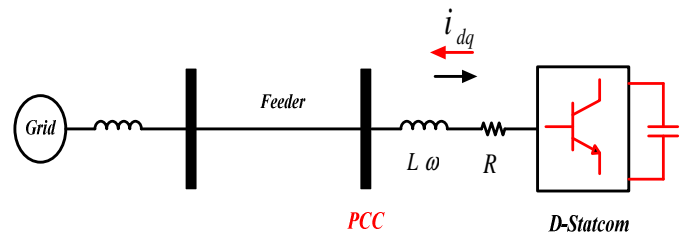
( $V_{dc} - V_{dc-ref}$ ) خطای ولتاژ باس DC با یک کنترل کننده مناسب قابل کنترل است. در حالت ماندگار تغییرات ولتاژ با نرخ کم در باس DC توسط تبادل توان اکتیو با شبکه کنترل می شود. این فرآیند با استفاده از جریان  $i_d$  انجام می شود زیرا جریان  $i_d$  متناظر با توان اکتیو شبکه یا باس DC است. مولفه جریان  $i_q$  نیز با توان راکتیو متناظر است. ولتاژ خروجی دو فازه  $v'_d, v'_q$  با استفاده از معادلات معکوس پارک به ولتاژ سه فازه  $v'_{abc}$  تبدیل می شود [۱۱،۱۰].

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	نوع ژنراتور	روتور قفس سنجابی
۲	فرکانس نامی	50Hz
۳	ولتاژ نامی	690v
۴	تعداد قطب	5
۵	سرعت نامی	1460rpm
۶	توان خروجی	660Kw

## ۲. سیستم کنترل جبران ساز استاتیکی سنکرون

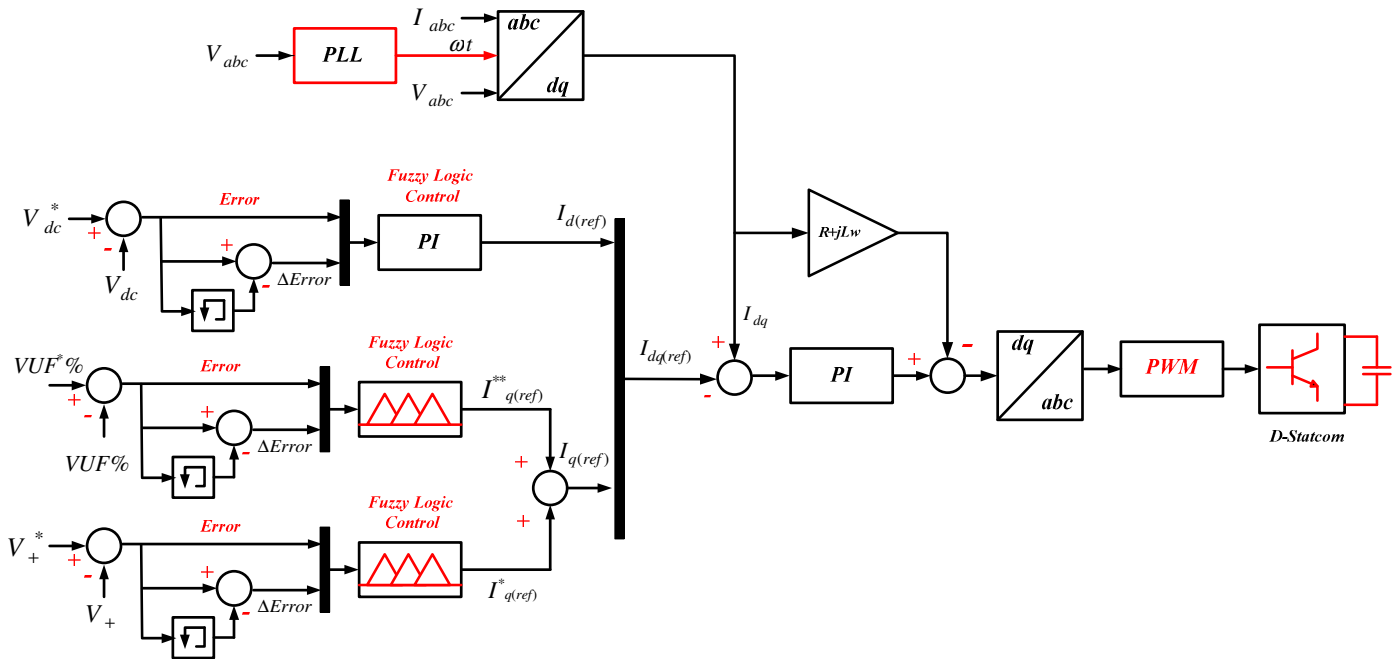
### ۲.۱. سیستم کنترلی جریان جبران ساز

شکل (۱) ساختار کلی جبران ساز استاتیکی در شبکه های توزیع را نشان می دهد. جبران ساز استاتیکی با جذب یا تولید توان راکتیو، ولتاژ را کنترل می کند. هنگامی که ولتاژ باس جبران ساز کمتر از ولتاژ باس اصلی باشد در این هنگام جبران ساز مانند سلف توان راکتیو جذب می کند. در زمانیکه ولتاژ باس جبران ساز بیشتر از ولتاژ اصلی باشد در این هنگام همانند خازن توان راکتیو تولید می کند [۱۱]. کنترل توان راکتیو و تنظیم ولتاژ در جبران ساز با تبادل توان راکتیو در نقطه اتصال به شبکه است.



شکل ۱: جبران ساز استاتیکی در شبکه توزیع

شکل (۲) بلوک دیاگرام ساختار سیستم کنترلی جبران ساز استاتیکی سنکرون با کنترل فازی (Fuzzy Logic Control) را نشان می دهد. سیستم کنترلی جبران ساز استاتیکی سنکرون شامل دو حلقه کنترلی می باشد، حلقه کنترلی خارجی که وظیفه کنترل ولتاژ باس DC و ثابت نگهداشتن ضریب توان و حلقه کنترلی داخلی وظیفه کنترل توان اکتیو و راکتیو را دارد [۸،۷]. ولتاژ  $(v_{abc})$  و جریان  $(i_{abc})$  اندازه گیری شده در نقطه اتصال به شبکه (PCC)، همگی متغیرهای



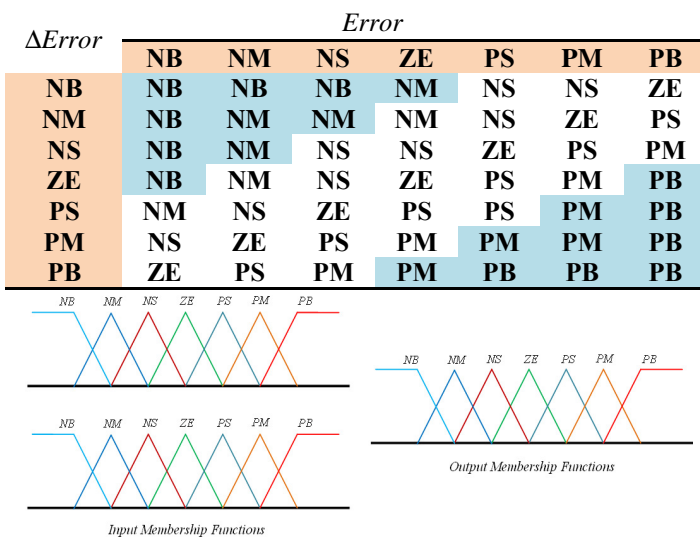
شکل ۲: کنترل فازی جبرانساز استاتیکی در شبکه توزیع با جریان پیشرو (Feed Forward)

$$y = \frac{\int \mu(x) dx}{\int \mu(x) dx} \quad (۴)$$

$$\begin{bmatrix} v'_a \\ v'_b \\ v'_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v'_d \\ v'_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_a + v_b + v_c}{3} \\ \frac{v_a + v_b + v_c}{3} \\ \frac{v_a + v_b + v_c}{3} \end{bmatrix} \quad (۳)$$

جدول (۲) پایگاه نگاشت قوانین (Fuzzy Logic Control) با دو ورودی و یک خروجی را نشان می‌دهد.

جدول ۲: نگاشت قوانین فازی

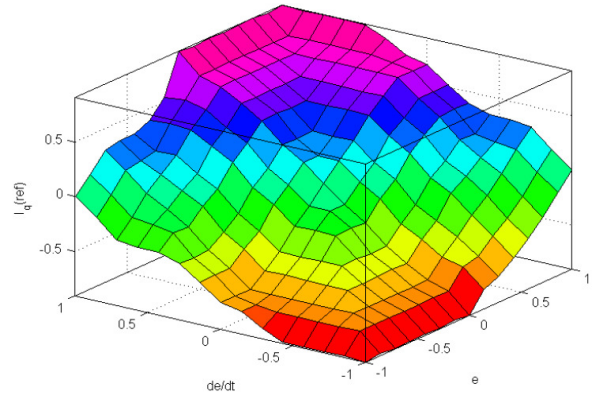


شکل ۳: توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی

## ۲.۲. کنترل فازی ممدانی پیشنهادی

سیستم‌های فازی قادر به مواجهه با مسائل خیلی پیچیده هستند. قدرت دیدگاه فازی در ارتباط با سیستم‌های غیرخطی پیچیده و مدل ریاضیاتی نامعروف است. کنترل سیستم‌های قدرت بدلیل غیرخطی، متغیر با زمان و پیچیدگی اغلب با روش‌های تحلیلی جواب نمی‌دهد. بنابراین استفاده از سیستم کنترل فازی روش مناسبتری برای کنترل سیستم‌های قدرت می‌باشد. توابع عضویت متغیرهای ورودی  $Error = (V_+^* - V_+)$  و  $\Delta Error$  و توابع عضویت متغیر خروجی  $I_{q(ref)}$  و توابع عضویت متغیر  $Error = (VUF\%^* - VUF\%)$  و توابع عضویت متغیر  $I_{d(ref)}$  در شکل (۳) نشان داده شده است. با استفاده از روش *Center of Area* میانگینی از همه قوانینی که صحیح هستند در نظر گرفته شده و خروجی عبارت خواهد شد:

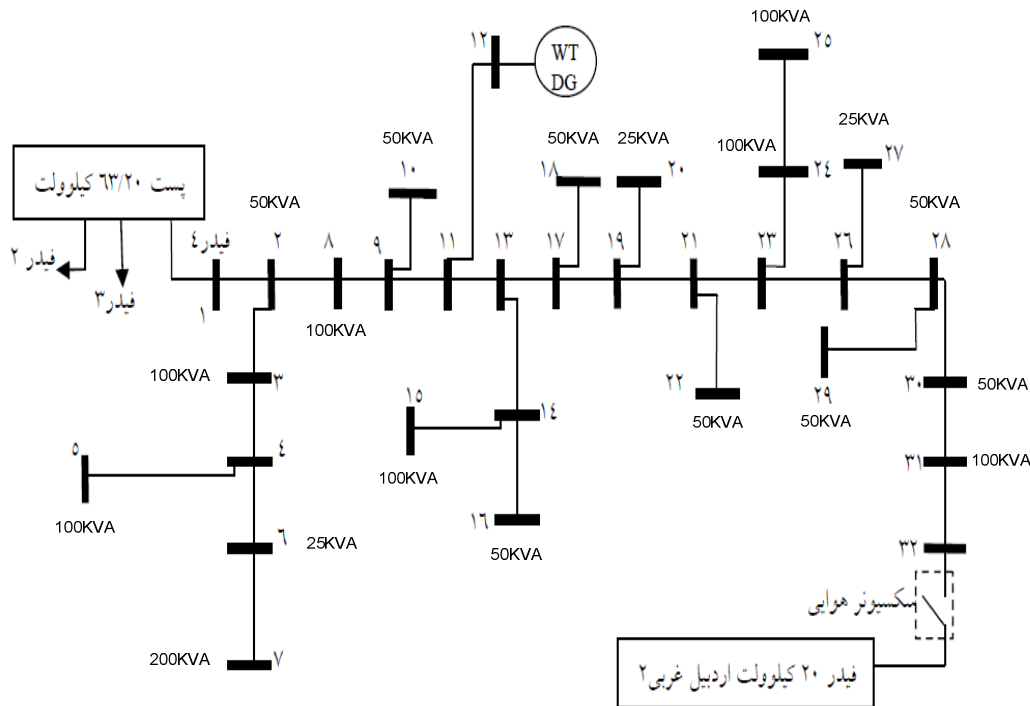
سرعین اخذ شده است. توربین بادی در ظرفیت نامی و ضریب بار ۰.۸۹ پس فاز مورد بهره برداری قرار می‌گیرد. این شبکه شامل ۳ فیدر توزیع فشار متوسط است. توربین بادی در باس ۱۲ فیدر ۴ قرار گرفته است. بارهای نامی هر یک از باس بارها در شکل نشان داده شده است. ضریب بار تمامی باس‌ها ۰.۹ پس فاز در نظر گرفته شده است. بار کلی فیدر ۲  $4200 + j1800KVA$  و بار کلی فیدر ۳  $2200 + j900KVA$  با ضریب بار ۰.۹ پس فاز است. بار کلی فیدر ۳  $(2200 + j900KVA)$  با ضریب بار ۰.۹ پس فاز است. جبران‌ساز استاتیکی سنکرون در باس ۱۲ و در سیستم واحد بادی تعبیه شده است. ظرفیت جبران‌ساز استاتیکی  $3MVar$  پیش‌بینی شده است.



شکل ۴: نمودار سطح کنترل توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی

### ۳. شبکه توزیع شهرستان سرعین

شکل (۵) شبکه توزیع شهرستان سرعین و چینش توربین بادی را نشان می‌دهد. تمامی اطلاعات از سیستم GIS شبکه توزیع شهرستان

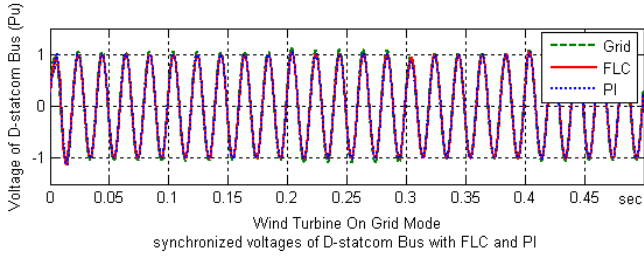


شکل ۵: شبکه توزیع برق شهرستان سرعین

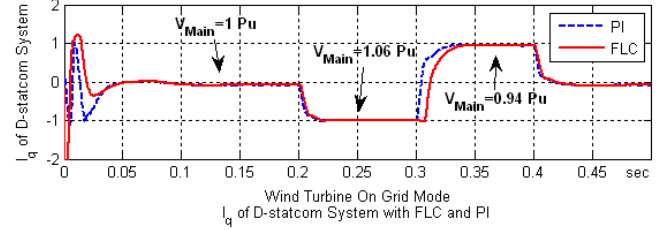
جهت تست سیستم کنترلی فازی، ولتاژ شبکه در  $t = 0.2s$  از  $1Pu$  به  $1.06Pu$  افزایش و سپس در  $t = 0.3s$  از  $1.06Pu$  به  $0.94Pu$  کاهش یافته و در  $t = 0.4s$  مقدار ولتاژ شبکه به  $1Pu$  می‌رسد. عملکرد سیستم کنترلی فازی با کنترل کننده PI در شرایط یکسان در شکل (۶) تا (۹) نشان داده شده است.

### ۴. نتایج شبیه‌سازی

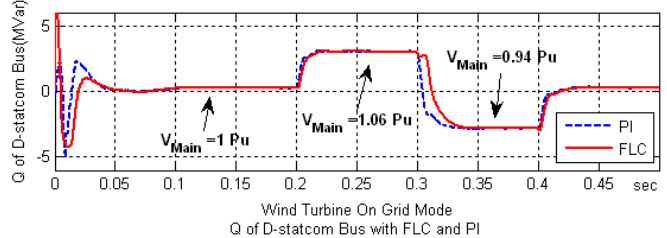
جهت انجام شبیه‌سازی در باس ۳۲ بار نوسانی (قوس کوره‌ای) با توان  $0.935MW$  و ضریب بار ۰.۹ پس‌فاز و دامنه تغییرات ولتاژ با فرکانس  $5Hz$  اضافه شده است. این بار نوسانی در  $t = 0.15s$  وارد مدار شده و به مدت یک دقیقه در شبکه قرار دارد. در مرحله اول



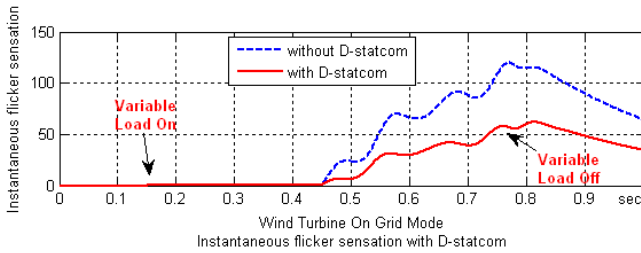
شکل ۱۱: سنکرون سازی ولتاژ در باس  $D-statcom$  با ولتاژ شبکه توزیع در مرحله سوم فیلتر تولیدی توسط بار قوس کوره‌ای با دامنه  $5Hz$  تغییرات ولتاژ در بازه زمانی  $0.15 < t < 0.75s$  در حضور جبران‌ساز استاتیکی با کنترل فازی شبیه سازی گردید. نتایج در شکل (۱۲) تا (۱۴) نشان داده شده است.



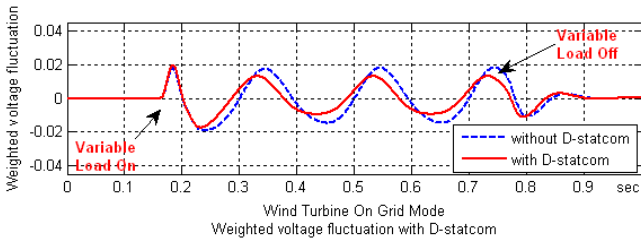
شکل ۶: جریان  $I_q$  در سیستم کنترلی جبران‌ساز استاتیکی



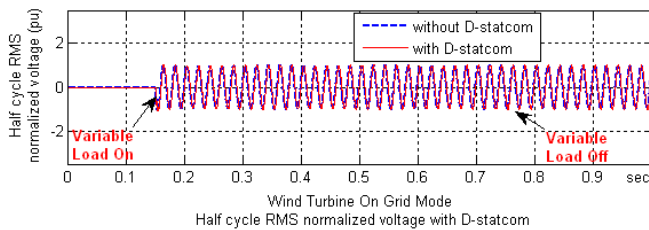
شکل ۷: توان راکتیو  $Q$  در باس جبران‌ساز استاتیکی



شکل ۱۲: آستانه آزردهی فیلتر در ولتاژ بار قوس کوره‌ای



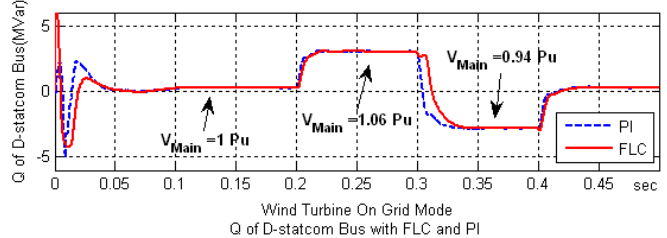
شکل ۱۳: وزن نوسان ولتاژ بار قوس کوره‌ای



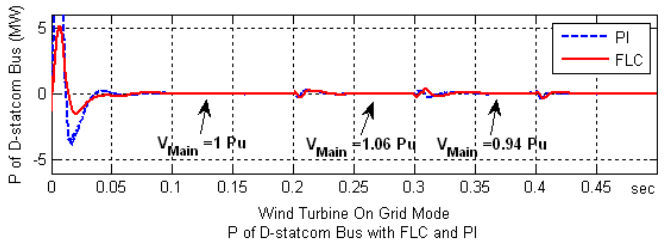
شکل ۱۴: مقدار موثر و نرمالیزه ولتاژ در نیم سیکل بار قوس کوره‌ای

## ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله کنترل فازی ممدانی با ماتریس پایگاه قوانین [۷\*۷] برای بهبود سیستم کنترلی جبران‌ساز استاتیکی سنکرون در محیط نرم‌افزار Matlab شبیه‌سازی و تحلیل گردید. نتایج نشان داد که

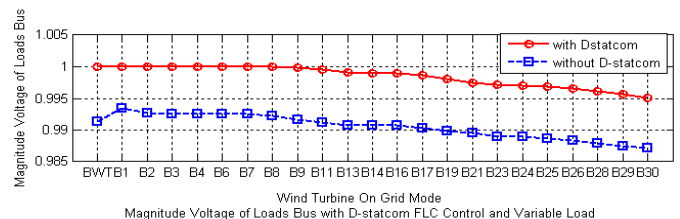


شکل ۸: توان اکتیو  $P$  در باس جبران‌ساز استاتیکی



شکل ۹: ولتاژ در باس  $Bus30$  شبکه توزیع با جبران‌ساز استاتیکی

در مرحله دوم با ثابت نگهداشتن ولتاژ شبکه در  $1Pu$ ، افت ولتاژ در باس‌های شبکه در حضور جبران‌ساز استاتیکی با کنترل فازی پیشنهادی بررسی گردید. شکل (۱۰) و (۱۱) میزان افت ولتاژ شبکه باس‌ها و سنکرون شدن ولتاژ جبران‌ساز با ولتاژ شبکه در دو حالت مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: پروفیل ولتاژ در باس بارهای فیدر ۴ شبکه توزیع

کنترل کننده پیشنهادی پاسخ مناسبتری نسبت به سایر کنترل کننده‌ها داشته است. جبران‌ساز استاتیکی سنکرون در زمان افت ولتاژ با جذب توان راکتیو و در زمان افزایش ولتاژ با تولید توان راکتیو باعث تنظیم ولتاژ شبکه گردید. سپس پخش بار شبکه توزیع با حضور واحد بادی و جبران‌ساز استاتیکی با نرم‌افزار انجام گردید. جدول (۳) شاخص مقایسه‌ای تلفات توان اکتیو و افت ولتاژ باس ابتدا و انتهای شبکه را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که وزن نوسان و آستانه آزرده‌گی فیلکر ولتاژ بار نوسانی با جبران‌ساز استاتیکی بهبود مناسبی داشته است.

جدول ۳: شاخص مقایسه‌ای

شاخص	با جبران‌ساز	بدون جبران‌ساز
تلفات توان اکتیو	1.02Kw	2.58Kw
افت ولتاژ بین باس ابتدا و انتها	0.0049Pu	0.0063Pu

### منابع

- [1] Nikos Hatziaargyriou, "Microgrids Architectures and Control," John Wiley and Sons Ltd, 2014.
- [2] Paulo Fernando Ribeiro, Carlos Augusto Duque, "Power systems Signal Processing For Smartgrids," John Wiley and Sons Ltd, 2014.
- [3] Djamila Rekioua "Wind Power Electric Systems Modeling, Simulation and Control," Publisher: Springer-Verlag London ,2014.
- [4] Fang Lin Luo and Hong Ye, "Advanced DC/AC Inverters: Applications in Renewable Energy," Taylor & Francis Group, LLC, 2012.
- [5] Jacob Klimstra, Markus Hotakainen, "Smart power generation," Publisher: Avain Publishers, Helsinki, 2011.
- [6] J. K. Kaldellis, "Stand-alone and hybrid wind energy systems Technology, energy storage," Woodhead Publishing Limited, 2010.
- [7] S. Chowdhury, S.P. Chowdhury and P. Crossley, "Microgrids and Active Distribution Networks," The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom ,2009.
- [8] Godfrey Boyle, "Renewable Electricity and the Grid," First published by Earthscan in the UK and USA ,2007.
- [9] Bin.Wu, "High-power converters and ac drives," Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, Canada, 2006.
- [10] M. M. Khaleel " Enhancement Power Quality with Sugeno-type Fuzzy Logic and Mamdani-type Fuzzy Logic Base on DVR," International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering Vol. 3, Issue 4, April 2014.
- [11] Janak B. P., Amitkumar S. "Modeling Analysis & Solution of Power Quality Problems Using DVR & DSTATCOM," IISRD -International Journal for Scientific Research & Development. Vol. 1, Issue 5, 2013.
- [12] B.C. Babu and K.B. Mohanty, "Doubly-Fed Induction Generator for Variable Speed Wind Energy Conversion Systems - Modeling & Simulation", International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol. 2, No. 1, pp. 1793-8163, 2010.