

## طراحی کنترل‌کننده میرایی برای SVC به منظور بهبود میرایی نوسانات فرکانس پایین

### سیستم در حضور مزارع بادی

مصطفی غندالی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده مهندسی برق - دانشگاه آزاد اسلامی واحد گرمسار - سمنان - ایران

چکیده - یکی از مهم‌ترین منبع انرژی‌های تجدید پذیر، انرژی باد می‌باشد. توان خروجی مزرعه بادی متناسب با سرعت باد تغییر می‌کند که این امر موجب افزایش نوسانات فرکانس پایین در سیستم می‌گردد. به طور معمول به منظور صاف کردن پروفیل ولتاژ خروجی مزرعه بادی از جبران‌کننده استاتیکی ولتاژ (SVC) استفاده می‌شود. در چنین شرایطی می‌توان با استفاده از روش‌های کنترلی، یک حلقه کنترلی دیگر بر روی SVC قرار داد تا بتوان میزان نوسانات فرکانس پایین ایجاد شده در سیستم را میرا نمود. در این مقاله، روشی برای طراحی کنترل‌کننده‌ای به منظور میرایی نوسانات فرکانس پایین سیستم ارائه گردد. در این مرحله از روش‌های تطبیق‌پذیر مبتنی بر منطق فازی برای تعیین پارامترهای کنترل‌کننده استفاده شده است.

کلید واژه - منطق فازی، طراحی کنترل‌کننده میرایی، جبران‌کننده استاتیکی ولتاژ، پایداری سیگنال کوچک، مزرعه بادی.

تطبیق‌پذیر تنظیم برای SVC بر پایه روش مانده معرفی شده است. در این حالت SVC یک تنظیم‌کننده خود تنظیم می‌باشد که پارامترهای کنترل‌کننده بر پایه مدل خطی شده سیستم حول نقطه کار بدست می‌آیند. از این رو، در این مقاله یک کنترل‌کننده بهینه مبتنی بر منطق فازی برای جبران‌ساز استاتیکی ولتاژ در ترمینال ژنراتور القایی مربوط به مزرعه بادی به منظور بهبود عملکرد دینامیکی سیستم قدرت در حضور مزرعه بادی پیشنهاد شده است.

این مقاله در ۵ بخش و به ترتیب زیر ارائه شده است. پس از مروری بر مطالعات گذشته، در بخش دوم، معادلات حاکم بر ژنراتور القایی و جبران‌ساز استاتیکی ولتاژ ارائه شده و در بخش سوم، منطق فازی و روش پیشنهادی مبتنی بر این منطق بیان شده و در بخش چهارم، شبیه‌سازی و نتایج حاصل ارائه گردیده است. نتیجه‌های بدست آمده از مطالعات و الگوریتم پیشنهادی در بخش پنجم ارائه شده است.

### ۲- روابط حاکم بر مسئله

#### ۲-۱- معادلات حاکم بر ژنراتور القایی

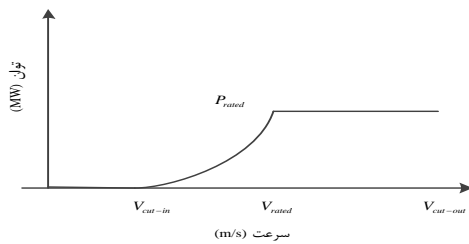
در این مطالعه به منظور مدل‌سازی رفتار ژنراتور توربین بادی از ژنراتور القایی دو سو تغذیه استفاده شده است. ساختار مداری DFIG در شکل (۱) آورده شده است. ولتاژها، جریان‌ها و

### ۱- مقدمه

نفوذ مزارع بادی در سیستم قدرت به طور پیوسته در حال افزایش می‌باشد و از میان تمام منابع انرژی که سهم خود را در تولید منابع تجدیدپذیر افزایش می‌دهند، رشد این منبع انرژی بسیار چشم‌گیر بوده است [۱]. توان خروجی یک مزرعه بادی به دلیل عدم قطعیت در سرعت باد، همواره متغیر می‌باشد. این عدم قطعیت در توان تولیدی مزرعه بادی موجب می‌گردد. استفاده از PSS ها در برخی اوقات قادر به تامین میرایی کافی و مناسب به منظور میراسازی نوسانات بین ناحیه‌ای نمی‌باشند. به منظور حل این مشکل، ادوات FACTS در مکان مناسب می‌توانند به منظور میراسازی نوسانات مورد استفاده قرار گیرند. با نصب یک کنترل‌کننده ثانویه بر روی این تجهیزات می‌توان میزان میرایی نوسانات فرکانس پایین سیستم را نیز بهبود بخشید [۳]. به منظور طراحی کنترل‌کننده میرایی برای SVC باید یک سیگنال کنترلی ثانویه به نقطه جمع سیگنال‌ها در SVC افزوده شده و کنترل‌کننده ثانویه میرایی به منظور بهبود میرایی مدهای بین ناحیه‌ای طراحی گردد [۵]. در [۶]، براساس ویژگی‌های سیستم و به کمک روش مانده و مکان هندسی ریشه‌ها و روش *prony* یک کنترل‌کننده میرایی برای SVC طراحی شده است. در [۷]، از روش مانده‌ها و روش *root-locus* به منظور طراحی کنترل‌کننده SVC استفاده شده است. در [۸]، یک روش

رابطه بین سرعت باد و توان مکانیکی خروجی در رابطه (۹) و نمودار سرعت-توان مزرعه بادی در شکل (۲) آورده شده است [۷]:

$$P_{m-wind} = \begin{cases} 0 & V_w \leq V_{cut-in} \\ 0.5\rho A_{wt} C_p(\beta, \lambda) V_w^3 & V_{cut-in} \leq V_w \leq V_{rated} \\ P_r & V_{rated} \leq V_w \leq V_{cut-out} \\ 0 & V_w \geq V_{cut-out} \end{cases} \quad (9)$$



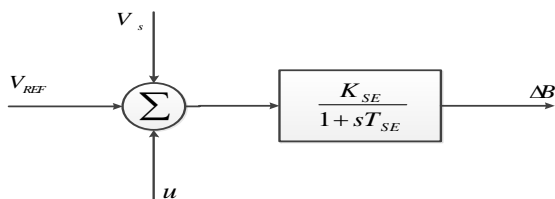
شکل ۲- توان خروجی مزرعه بادی

$P_m$  توان مکانیکی بدست آمده از باد،  $\rho$  چگالی هوا،  $C_p$  ضریب بازدهی توربین،  $\lambda$  ضریب سرعت نوک،  $A_{wt} = \pi R^4$  برابر با فضای است که روتور توربین بادی پوشش می دهد و  $R$  شعاع روتور می باشد؛  $V_w$  بیانگر سرعت باد و  $\beta$  زاویه پیچشی پره می باشد. مطالعات نشان می دهند که تغییرات سرعت باد بیشترین مطابقت را تابع چگالی احتمال ویبال دارند. از این رو، مدل سازی تغییرات سرعت باد به صورت احتمالاتی و به کمک توزیع ویبال صورت خواهد گرفت. رابطه (۱۰) یک توزیع ویبال از سرعت باد را نشان می دهد.

$$y = f(x | c, k) = kc^{-k} x^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^k} \quad (10)$$

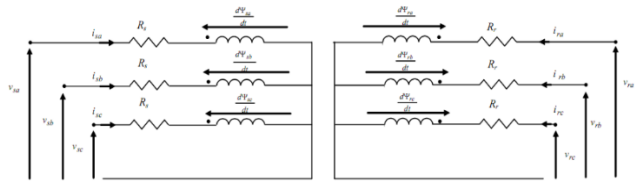
### ۲-۳- مدل جبران ساز استاتیکی ولتاژ

ساختار جبران ساز استاتیکی ولتاژ در شکل (۳) نشان داده شده است. در این مقاله، SVC توسط یک مدل مرتبه اول نمایش داده شده است. سیگنال ورودی به کنترل کننده مکمل تغییرات سرعت می باشد [۷].



شکل ۳- بلوک دیاگرام SVC

شارهای استاتور ماشین توسط معادلات الکتریکی (۱) الی (۳) بیان شده است [۶]:



شکل ۱- مدار معادل الکتریکی ژنراتور القایی دو سو تغذیه

$$v_{sa}(t) = R_s i_{sa}(t) + \frac{d\Psi_{sa}(t)}{dt} \quad (1)$$

$$v_{sb}(t) = R_s i_{sb}(t) + \frac{d\Psi_{sb}(t)}{dt} \quad (2)$$

$$v_{sc}(t) = R_s i_{sc}(t) + \frac{d\Psi_{sc}(t)}{dt} \quad (3)$$

که  $R_s$  مقاومت استاتور،  $i_{sa}$ ،  $i_{sb}$  و  $i_{sc}$  جریان های استاتور فازهای  $a$ ،  $b$  و  $c$  و  $v_{sa}$ ،  $v_{sb}$  و  $v_{sc}$  ولتاژهای استاتور و  $\Psi_{sa}$ ،  $\Psi_{sb}$  و  $\Psi_{sc}$  شارهای استاتور می باشند. به طور مشابه تغییرات دامنه های روتور به وسیله معادلات (۴) الی (۶) در ادامه آورده شده است.

$$v_{ra}(t) = R_r i_{ra}(t) + \frac{d\Psi_{ra}(t)}{dt} \quad (4)$$

$$v_{rb}(t) = R_r i_{rb}(t) + \frac{d\Psi_{rb}(t)}{dt} \quad (5)$$

$$v_{rc}(t) = R_r i_{rc}(t) + \frac{d\Psi_{rc}(t)}{dt} \quad (6)$$

که  $R_r$  مقاومت روتور،  $i_{ra}$ ،  $i_{rb}$  و  $i_{rc}$  جریان های روتور فازهای  $a$ ،  $b$  و  $c$  و  $v_{ra}$ ،  $v_{rb}$  و  $v_{rc}$  ولتاژهای روتور و  $\Psi_{ra}$ ،  $\Psi_{rb}$  و  $\Psi_{rc}$  شارهای روتور می باشند. کل توان لحظه ای ماشین ( $p(t)$ ) مساوی مجموع توان های لحظه ای روتور و استاتور است.

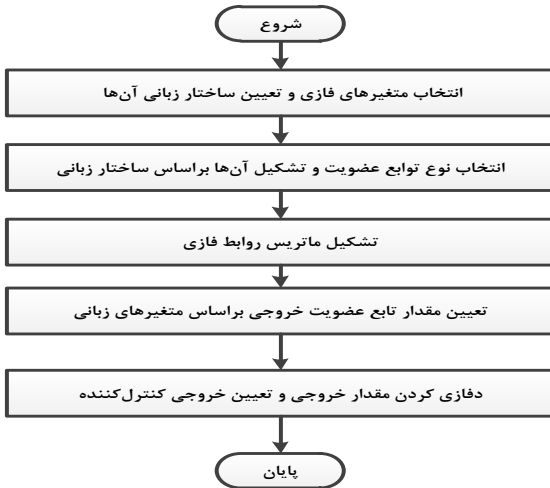
$$P(t) = \frac{3}{2} \text{Re}\{\bar{v}_s \cdot \bar{i}_s^*\} = \frac{3}{2} \text{Re}\{\bar{v}_r \cdot \bar{i}_r^*\} \quad (7)$$

گشتاور تولید شده توسط ژنراتور را می توان از توان مکانیکی، مطابق رابطه زیر بدست آورد:

$$T_{em} = \frac{P_{mech}}{\omega_m / p} = -\frac{3}{2} p \cdot \text{Re}\{j \cdot \bar{\Psi}_r \cdot \bar{i}_r^*\} \quad (8)$$

### ۲-۲- مدل سازی توان خروجی مزرعه بادی

متغیر زبانی است، بنابراین جدول قواعد فازی برحسب این دو ورودی در دارای ۴۹ قاعده فازی خواهد بود.



شکل ۵- روند طراحی کنترل‌کننده با استفاده از منطق فازی (۳) برای  $N$  متغیر زمانی برای  $\Delta\omega$ ،  $\Delta P$  و  $N^2$  ترکیب احتمالی (حالت‌های ورودی) وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به هر کدام از  $M$  مقدار ممکن برای خروجی کنترل‌کننده فازی  $u$ ، نگاشت. تمام ترکیب‌های ممکن بین ورودی و خروجی کنترل‌کننده  $u$  در ماتریس روابط فازی قرار داده شده‌اند. (۴) مقادیر تابع عضویت برای بخش شرایط هر کدام از قانون‌های فازی توسط قانون ترکیب که در ادامه آورده شده است، بدست می‌آید:

$$\mu(x_i) = \mu(\Delta s \text{ is } LP, \text{ and } \Delta\alpha \text{ is } LN) = \min[\mu(\Delta s \text{ is } LP), \mu(\Delta\alpha \text{ is } LN)]; i = 1, 2, \dots, N^2 \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)،  $x_i$  برابر با  $i$  امین مقدار از  $N^2$  حالت ممکن (ترکیب‌های ورودی) در قواعد منطق فازی می‌باشد.

(۵) مقادیر تابع عضویت برای خروجی که توسط  $M$  متغیر زبانی مشخص می‌گردند، سپس با استفاده از تقاطع  $N^2$  مقدار از تابع عضویت  $\mu(x)$  با مقادیر مربوط به هر یک از متغیرهای تصمیم‌گیری در قواعد منطق فازی بدست می‌آید. برای مثال، برای تصمیم  $LN \subset M$  و برای حالت  $x_i$ ، مقدار خروجی عضویت برابر خواهد با:

$$\mu_i(x_i, LN) = \min[\mu(x_i, LN), \mu(x_i)]; i = 1, 2, \dots, N^2 \quad (14)$$

که  $\mu(x_i, LN)$  مقدار تابع عضویت خروجی مربوط به متغیر زبانی  $LN$  زمانی که حالت ورودی  $x_i$  باشد. مقدار نهایی خروجی

معادلات یک سیستم جبران ساز استاتیکی را می‌توان مطابق رابطه ذیل ارائه نمود:

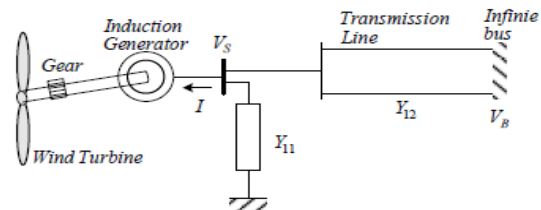
$$\dot{B}_{svc} = \frac{K_{svc}}{T_{svc}}(v_{svc} - v_{ref}) - \frac{1}{T_{svc}}B_{svc} \quad (11)$$

هدف ما اضافه کردن یک سیگنال کنترلی به رابطه فوق است بطوریکه سیگنال مذکور توسط منطق فازی و بر اساس اطلاعات دریافتی از انحرافات توان اکتیو و سرعت روتور، تعیین می‌شود. در نتیجه، رابطه (۱۱) را می‌توان به صورت رابطه زیر نوشت:

$$\dot{B}_{svc} = \frac{K_{svc}}{T_{svc}}(v_{svc} - v_{ref} + u_{fuzzy}) - \frac{1}{T_{svc}}B_{svc} \quad (12)$$

که  $\Delta B$ ،  $\Delta V_s = V_{REF} - V_s$  تغییرات سوسپیتانس،  $b_{11}$  و  $u$  سیگنال کنترل فازی برای سیستم ژنراتور توربین بادی می‌باشد.

یک مدار معادل برای سیستم مورد مطالعه در حضور مزرعه بادی و مدار معادل جبران‌ساز استاتیکی ولتاژ در شکل (۴) نشان داده شده است. پس از معرفی روابط حاکم بر اجزای سیستم مورد مطالعه در بخش بعدی روش پیشنهادی به منظور طراحی کنترل‌کننده میرایی مبتنی بر منطق فازی ارائه شده است. به منظور طراحی کنترل‌کننده میرایی نوسانات فرکانس پایین مبتنی بر منطق فازی برای مزرعه بادی مراحل زیر مطابق شکل (۵) در نظر گرفته شده است.



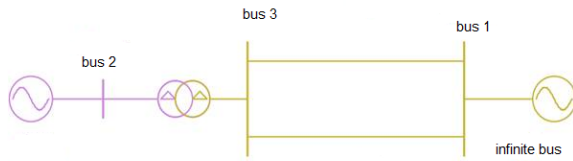
شکل ۴- سیستم مورد مطالعه

ورودی‌های انتخاب شده برای کنترل‌کننده فازی  $\Delta P$  و  $\Delta\omega$  توسط توابع عضویت در یک مجموعه فازی ارائه می‌گردد. در این مطالعه از تابع عضویت مثلثی استفاده شده است.

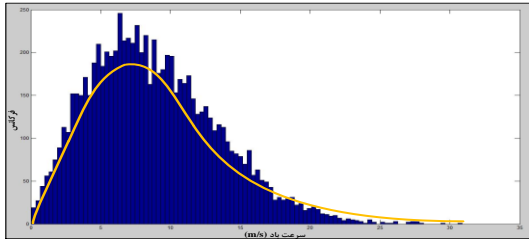
(۱) یک مجموعه از قوانین تصمیم‌گیری که ورودی‌ها را به خروجی‌ها مرتبط می‌سازد، جمع‌آوری شده و در حافظه به شکل یک جدول تصمیم‌گیری ذخیره شده است.

(۲) دو ورودی تغییرات سرعت ( $\Delta\omega$ ) و تغییرات توان خروجی ( $\Delta P$ ) به عنوان ورودی و به صورت فازی تعریف می‌شوند. با توجه به اینکه تابع عضویت هر کدام از این ورودی‌ها دارای ۷

۲۰۲۰ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

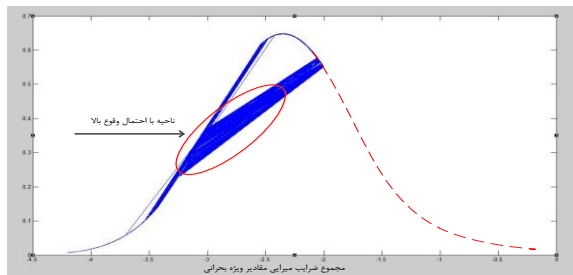


شکل ۶- سیستم تک ماشین متصل به شین بی نهایت



شکل ۷- تغییرات سرعت باد

در ابتدا در حضور مزرعه بادی وضعیت پایداری سیستم به صورت احتمالاتی مورد بررسی قرار گرفته است. در حقیقت، با نمونه‌گیری از پروفیل توان خروجی مزرعه بادی برای ۱۰۰۰ تکرار، مقادیر ویژه در سیستم محاسبه شده و مقادیر ویژه‌ای که دارای ضریب میرایی بیشتر از ۰/۱ هستند، به عنوان مدهای پایدار، مقادیر ویژه با ضریب میرایی بین ۰ تا ۰/۰۵ به عنوان مدهای پایدار مرزی و مقادیر ویژه با ضریب میرایی کوچک‌تر از صفر به عنوان مدهای ناپایدار در نظر گرفته شده‌اند. تابع چگالی احتمال مربوط به نوسانات و تغییرات ضرایب میرایی در شکل (۸) آورده شده است.



شکل ۸- ضرایب میرایی مقادیر ویژه بحرانی

#### ۴-۱- طراحی کنترل‌کننده فازی با استفاده از اطلاعات

##### انحراف سرعت و توان اکتیو

با شبیه‌سازی سیستم فوق، توان اکتیو خروجی مزرعه بادی به صورت شکل (۹) مشاهده می‌شود. با توجه به شکل، توان اکتیو ژنراتور دارای ماهیت نوسانی بوده و این رفتار در شرایط حالت دائم سیستم که متناظر با شرایط کاری نیز است، ادامه دارد. هدف ما حذف این نوسانات به‌ویژه در شرایط کاری سیستم است. برای این منظور، سعی داریم با افزودن یک کنترل‌کننده در

کنترل‌کننده LN به کمک ارزیابی و پیوند تمام‌خروجی رابطه (۱۴) توسط رابطه (۱۵) که در ادامه معرفی شده است، بدست می‌آید.

$$\mu_u(LN) = \max\{\mu_u(x_i, LN)\}, \text{for all } x_i \quad (15)$$

(۶) خروجی‌های فازی  $\mu_u(LN)$  و  $\mu_u(LP)$  بوده که در ادامه به منظور دستیابی به خروجی کنترلی کریسپ  $u$  باید دفازی گردد. فازی زادی سیستم فازی، فازی زادی میانگین مرکز انتخاب شده است. بر اساس این فازی زدا، کافی است مرکز توابع عضویت خروجی محاسبه گردد. مراکز توابع عضویت خروجی کنترل‌کننده فازی به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\mu u_i = u_{\min} + \frac{u_{\max} - u_{\min}}{m-1} (i-1), \quad (16)$$

$$i = 1, 2, \dots, m, u_{\min} = -1, u_{\max} = 1$$

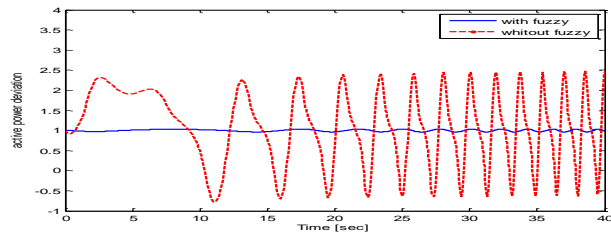
لازم به ذکر است که بازه تغییرات سیگنال کنترلی در بازه ۱- تا ۱ توزیع شده است که در صورت عدم جبران سازی مناسب، از بهره استاتیکی برای تقویت سیگنال استفاده می‌گردد. کنترل‌کننده فازی بر اساس فازی گر تکین، موتور استنتاج ضرب و فازی زادی میانگین مرکز به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$\mu_{fuzzy} = \frac{\sum_{l=1}^{49} \mu_{A_1^l}(\Delta P(t)) \mu_{A_2^l}(\Delta w(t))}{\sum_{l=1}^{49} \mu_{A_1^l}(\Delta P(t)) \mu_{A_2^l}(\Delta w(t))} \quad (17)$$

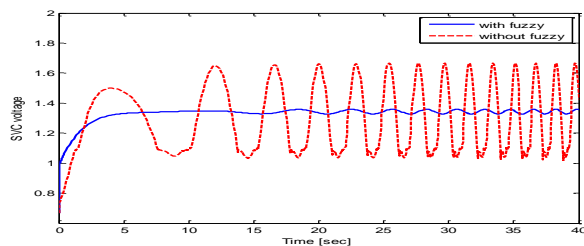
#### ۳- شبیه‌سازی و مطالعات عددی

در این مطالعه از یک مزرعه بادی با ۳۰ توربین هر کدام به ظرفیت ۲ مگاوات و توان کل مزرعه بادی ۶۰ مگاوات استفاده شده است. شکل (۶) نمودار تک‌خطی سیستم مورد نظر را نشان می‌دهد. پس از انجام مطالعات مربوط به کنترل‌کننده میرایی، این کنترل‌کننده بر روی شین شماره ۲ نصب شده و براساس روابط معرفی شده و نتایج بدست آمده میزان نوسانات سیستم را میرا می‌کند. پروفیل تغییرات باد براساس میزان فرکانس تکرار آن در طی یک بازه یک‌ساله در یک منطقه فرضی به صورت شکل (۷) ارائه شده است.

انحراف توان اکتیو	انحراف سرعت روتور ( $\Delta\omega$ )						
$\Delta P$	VS	S	NM	M	PM	B	VB
VS	NB	NB	NB	NB	NS	NS	Z
S	NB	NB	NM	NM	NS	Z	PS
NM	NB	NM	NM	NS	Z	PS	PM
M	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM
PM	NM	NS	Z	PS	PM	PM	PB
B	NS	Z	PS	PM	PM	PB	PB
VB	Z	PM	PM	PB	PM	PB	PB



شکل ۱۲- مقایسه نتیجه اعمال سیستم فازی برای میراسازی نوسانات شکل (۱۳)، ولتاژ خط انتقال را با و بدون استفاده از کنترل کننده فازی نشان می دهد. با توجه به شکل، جبران ساز اعمالی به ساختار SVC توانسته است تا حد زیادی نوسانات ولتاژ خط انتقال را نیز میرا نماید.



شکل ۱۳- ولتاژ خط انتقال با و بدون کنترل کننده فازی

#### ۲-۴- طراحی کنترل کننده فازی با استفاده از اطلاعات انحراف ولتاژ و مشتق آن

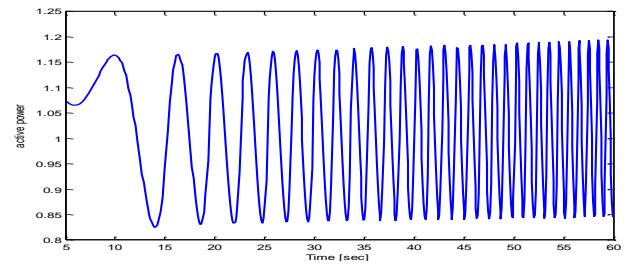
حال بار دیگر طراحی کنترل کننده با استفاده از اطلاعات انحراف ولتاژ خط انتقال و مشتق آن، صورت گرفته و عملکرد آن با کنترل کننده قبل مقایسه می گردد.

جدول ۲- پایگاه قواعد فازی برای کنترل کننده فازی

انحراف ولتاژ	مشتق انحراف ولتاژ خط انتقال				
	NB	NS	Z	PS	PB
خط انتقال					
NB	NB	NS	NB	NS	Z
NS	NS	NB	Z	Z	PS
Z	NS	Z	Z	PS	PS
PS	Z	Z	PS	PS	PS
PB	Z	PS	PS	PS	PB

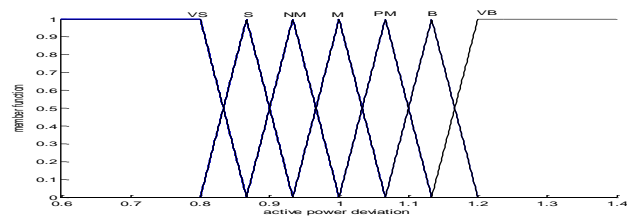
با انتخاب پنج مجموعه فازی و استفاده از توابع عضویت مثلثی، پایگاه قواعد فازی برای طراحی جبران ساز فازی مطابق جدول (۲) ارائه شده است. شکل (۱۴)، انحراف توان اکتیو را با و بدون استفاده از جبران ساز فازی نشان می دهد.

ساختار حلقه بسته، میزان سوسپتانس جبران ساز استاتیکی ولتاژ را به گونه ای تعیین کنیم که نوسانات توان اکتیو تا حد امکان میرا شود.



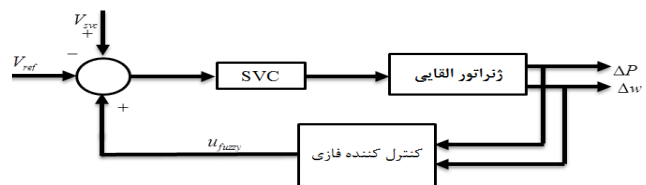
شکل ۹- توان اکتیو ژنراتور القایی و رفتار نوسانی آن

در این مقاله، از تابع عضویت مثلثی استفاده شده است. نمونه ای از تابع عضویت تشکیل شده برای انحراف توان اکتیو در شکل (۱۰) آورده شده است.



شکل ۱۰- توابع عضویت انحراف توان اکتیو

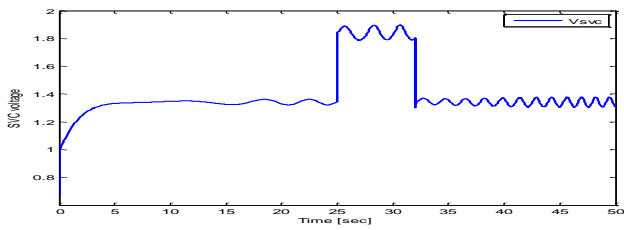
خروجی سیستم فازی سیگنال کنترلی از جنس ولتاژ است که با انحراف ولتاژ خط انتقال جمع می شود. این مسئله در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



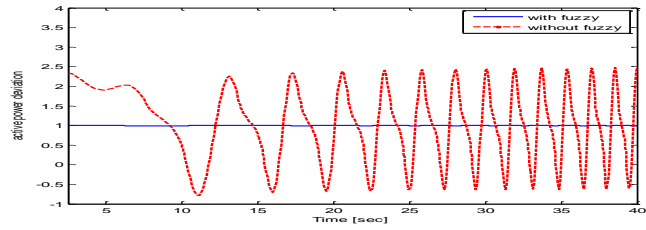
شکل ۱۱- ورودی ها و خروجی سیستم های فازی

با بررسی رفتار SVC و شبیه سازی سیستم در شرایط بدون کنترل کننده فازی، قواعد فازی مطابق جدول (۱) ارائه شده است. انحراف توان اکتیو در حضور کنترل کننده فازی و بدون حضور آن در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، کنترل کننده فازی به خوبی توانسته است نوسانات حالت مانای انحراف توان اکتیو را میرا نماید.

جدول ۱- پایگاه قواعد فازی برای کنترل کننده فازی



شکل ۱۳- ولتاژ خط با وجود اغتشاش با کنترل کننده فازی



شکل ۱۴- انحراف توان اکتیو با و بدون استفاده از جبران ساز فازی

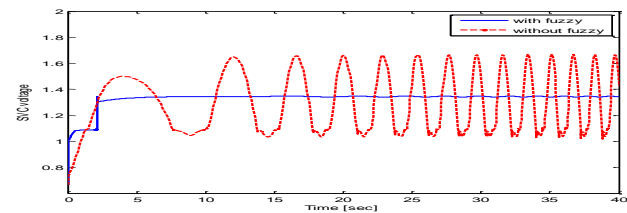
#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله، از یک کنترل کننده فازی که به طور موازی با جبران ساز استاتیکی ولتاژ قرار گرفته است، بهره گرفته شد. نتایج نشان می دهد که تغییرات مداوم سرعت باد موجب نوسان توان خروجی مزرعه بادی شده که منجر به تغییر مکان مقادیر ویژه گشته و ناپایداری سیگنال کوچک سیستم را در بر خواهد داشت. کنترل کننده فازی طراحی شده به خوبی پاسخگویی شرایط نوسانی سیستم بوده و متناسب با تغییرات توان خروجی، مقادیر مطلوبی برای سوسپتانس تعیین می گردد که موجب کاهش نوسانات می گردد. علاوه بر این، به دلیل ماهیت تطبیق پذیر بودن کنترل کننده طراحی شده، کنترل کننده توانایی پاسخگویی به ازای شرایط بهره برداری مختلف را خواهد داشت.

#### مراجع

- [1] Global Wind Energy Council (GWEC), "Global energy outlook," 2010, <http://www.gwec.net/fileadmin/documents/Publications/GWEOfinal.pdf>.
- [2] B. Pal and B. Chaudhuri, *Robust control in power systems*. New York: Springer, 2005.
- [3] L. C. Zolotas, P. Korba, B. Chaudhuri, and I. M. Jaimoukha, "H2 LMI based Robust Control for Damping Oscillations in Power Systems," in *IEEE International Conference on System of Systems Engineering, 2007. SoSE '07*. 2007, pp. 1-8.
- [4] D. Shiojima, M. Cheng, T. Isobe, "Control and design principle of SVC-MERS — A new reactive power compensator with line frequency switching and small capacitor," ECCE, 2012.
- [5] C. Neto, F. Costa, R. Barreto, "Wavelet-based method for detection of electrical and electromechanical oscillations in synchronous generators," COBEP 2013.
- [6] RN. Islam, M. Hannan, H. Shareef, A. Mohamed, "SVC damping controller design based on firefly optimization algorithm in multi machine power system." IEEE CEAT, 2013.
- [7] A. Jalilvand, M. Daviran, "Adaptive SVC damping controller design using residue method in a multi-machine system", *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2009. ECTI-CON 2009*.

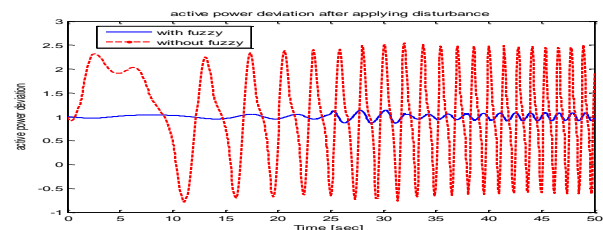
شکل (۱۵)، میراشدن نوسانات ولتاژ خط انتقال را نشان می دهد که حاکی از رفتار مطلوب سیستم حلقه بسته در حذف نوسانات حالت مانا است.



شکل ۱۵- ولتاژ خط انتقال با و بدون استفاده از جبران ساز فازی

#### ۴-۳- ارزیابی کنترل کننده فازی با اعمال اغتشاش

در ادامه اغتشاشی به سیستم اعمال شده و عملکرد کنترل کننده فازی در میراسازی نوسانات تحت اغتشاش بررسی شده است. برای این منظور، فرض کنید اغتشاش پله با دامنه کم اما مدت زمان نسبتاً طولانی در ولتاژ خط انتقال، اختلال ایجاد کند. این اغتشاش با دامنه ۰/۵ در بازه ۲۵ تا ۳۲ ثانیه اعمال شود. شکل (۱۶)، نتیجه شبیه سازی تحت شرایط مذکور را نشان می دهد.



شکل ۱۶- دفع اغتشاش با جبران ساز فازی

با توجه به شکل، وجود اغتشاش باعث تغییر محسوسی در نوسانات انحراف توان اکتیو می شود. ولتاژ خط انتقال با وجود اغتشاش پله در شکل (۱۷) مشاهده می شود. بر اساس نتیجه به دست آمده، کنترل کننده فازی می تواند نوسانات ولتاژ را میرا نموده و اثر اغتشاش را در زمان کوتاهی دفع نماید.