

مجموعه مقالات دهمین همایش ملی انرژی‌های تجدیدپذیر، پاک و کارآمد

دوم دی ماه ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ – (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم‌اندیشان انرژی‌های شیمیایی

ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام ISC

www.Renewenergy.ir



## بررسی و مقایسه عملکرد مزارع بادی مبتنی بر ژنراتور القایی تک‌قفسه و دو‌قفسه متصل به خط انتقال جبران شده با خازن سری

عباس سلیمانی<sup>۱</sup>، روح‌الامین زینلی داورانی<sup>۲</sup>

کرمان - انتهای اتوبان هفت باغ علوی - دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته

farhadssoleimanielc@gmail.com

### چکیده

این مقاله، سطح جبران‌سازی سری بحرانی در یک مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتور القایی تک‌قفسه و دو‌قفسه متصل به خط انتقال جبران شده با خازن سری را ارزیابی و اثر پارامترهای مختلف سیستم و مزرعه بادی را بر پدیده تشدید زیر سنکرون بررسی می‌کند. طبق تعریف سطح جبران‌سازی که مدّ زیر سنکرون وارد ناحیه ناپایداری می‌شود را سطح جبران‌سازی بحرانی نامیده و اثر پارامترهای مختلف از جمله، اثر پارامترهای ژنراتور القایی و اثر پارامترهای خط انتقال، بر ناپایداری این مدّ بررسی خواهد شد. به‌منظور تحلیل از آنالیز سیگنال کوچک و از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** اثر ژنراتور القایی، تشدید زیر سنکرون، جبران‌سازی سری بحرانی، ژنراتور القایی تک‌قفسه، ژنراتور القایی دو‌قفسه، مزرعه بادی

۱- دانشجو

۲- استادیار

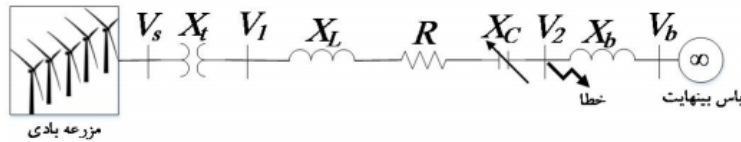


## ۱- مقدمه

در سراسر جهان ظرفیت نصب‌شده نیروگاه‌های بادی به سرعت در حال افزایش است [۱]. پیشرفت فناوری، بهبود طراحی و کاهش هزینه‌ها یک نقش مؤثر در افزایش سطح نفوذ نیروگاه‌های بادی در سیستم قدرت را داشته است [۲]. پیشرفت در الکترونیک قدرت، انرژی باد را به‌عنوان یک جایگزین رقابتی و جدی با سایر منابع انرژی تجدید پذیر قرار داده است [۳]. تعداد زیادی از کشورها هدف خود را مبنی بر تولید ۲۰ درصد از انرژی خود توسط منابع انرژی تجدید پذیر تا سال ۲۰۲۰ میلادی قرار داده‌اند که انرژی باد به‌عنوان عامل اول توسعه مدنظر می‌باشد [۳]، [۴]. به‌طور ویژه اروپای شمالی، آلمان، اسپانیا، آمریکا، کانادا، چین و هند یک دستاورد قوی در توسعه سیستم‌های انرژی باد از خود نشان داده‌اند. در پایان سال ۲۰۱۱، ظرفیت نصب‌شده در سراسر جهان ۲۳۸ گیگاوات بوده است [۴]. اتصال نیروگاه‌های بادی بزرگ در شبکه‌های انتقال و توزیع دارای چندین مشکل اساسی می‌باشند. مزارع بادی بزرگ به‌طور معمول در مناطق دوردست با الگوی باد مناسب قرار دارند که باعث ایجاد خط انتقال بلند و در پی آن کاهش توان انتقالی می‌گردد [۵-۸]. یکی از راه‌های رفع این مشکل بهبود اساسی زیربنای شبکه انتقال شامل ساخت خطوط جدید بوده که به‌طور معمول صرفه اقتصادی ندارد. روش دیگر جبران‌سازی سری است که به‌عنوان یک روش مؤثر افزایش توانایی انتقال توان با خطوط انتقال موجود می‌باشد. از این‌رو، جبران‌سازی سری مورد توجه برای نیروگاه‌های بادی بزرگ قرار گرفته است [۶-۸]. از طرفی امکان تشدید زیر سنکرون در توربین‌های بادی مبتنی بر ژنراتور القایی به دلیل حضور خازن سری در خط انتقال وجود دارد [۵-۱۱]؛ بنابراین اگر ژنراتورهای توربین بادی به‌طور شعاعی به خطوط انتقال جبران سری متصل باشند، امکان تشدید زیر سنکرون به علت اثر ژنراتور القایی در سطوح جبران‌سازی سری بالا وجود دارد [۷]، [۸]. در مطالعات پایداری سیستم‌های قدرت، ژنراتورهای القایی به‌طور معمول با ژنراتورهای القایی تک قفسه ساده مدل می‌شوند. در [۸] و [۷] تحلیل تشدید زیر سنکرون در مزرعه بادی با ژنراتور القایی تک قفسه و دو قفسه متصل به خط انتقال جبران سری ارائه شده است، اما اثر ظرفیت‌های مختلف مزرعه بادی و پارامترهای سیستم مورد مطالعه بر سطح جبران‌سازی سری بحرانی بررسی نگردیده است. در این مقاله یک الگوریتم برای محاسبه سطح جبران‌سازی سری بحرانی سیستم و اثر ظرفیت‌های مختلف مزرعه بادی و پارامترهای سیستم بر سطح جبران‌سازی سری بحرانی در نظر گرفته شده است. در قسمت ۲ مقاله، سیستم تحت مطالعه و مدل‌سازی ریاضی آن معرفی گردیده است. قسمت ۳ به شرح جنبه‌های مختلف تشدید زیر سنکرون می‌پردازد. قسمت ۴، نتایج حاصل از آنالیز سیگنال کوچک و اثر ظرفیت‌های مختلف مزرعه بادی و پارامترهای سیستم مورد مطالعه بر سطح جبران‌سازی سری بحرانی را بیان می‌دارد؛ و در قسمت ۵ نتیجه‌گیری حاصل از کار انجام‌شده، آورده شده است.

## ۲- توصیف سیستم

شکل ۱ سیستم مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این سیستم شامل یک مزرعه بادی بزرگ می‌باشد که از طریق خط انتقال بلند با جبران‌سازی سری به باس بینهایت وصل گردیده است. پارامترهای سیستم مورد مطالعه در پیوست، آمده است. در ادامه به‌منظور مدل‌سازی سیستم مورد مطالعه، معادلات مرتبط با بخش‌های مختلف آن ارائه می‌گردد. اجزای سیستم مورد مطالعه عبارتند از: (۱) سیستم پیچشی توربین، (۲) ژنراتور القایی و (۳) خط انتقال جبران سری.



شکل ۱- سیستم مورد مطالعه

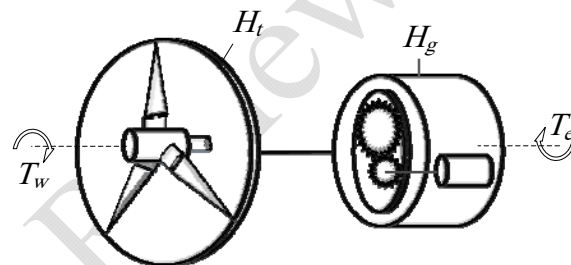
### ۳- سیستم پیچشی توربین بادی

در این مقاله برای تحلیل تشدید زیر سنکرون، شفت توربین-ژنراتور به صورت مدل دو جرمه در نظر گرفته شده است که شامل دو اینرسی توربین و ژنراتور ( $H_t, H_g$ )، سختی شفت بین توربین و ژنراتور ( $K_{ig}$ )، ضریب میرایی ( $D_{ig}, D_g, D_t$ )، سرعت زاویه‌ای توربین و ژنراتور ( $\omega_g, \omega_t$ )، زاویه‌ی پیچشی بین توربین بادی و ژنراتور ( $\delta_{ig}$ )، گشتاور الکترومغناطیسی ( $T_e$ ) و گشتاور مکانیکی ( $T_w$ ) می‌باشد. معادلات دینامیکی سیستم شفت در روابط (۱)، (۲) و (۳) بیان شده است [۷].

$$2H_t \frac{d}{dt} \omega_t = T_w - K_{ig} \delta_{ig} - D_{ig} (\omega_t - \omega_g) \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \delta_{ig} = \omega_t - \omega_g \quad (2)$$

$$2H_g \frac{d}{dt} \omega_g = K_{ig} \delta_{ig} - D_{ig} (\omega_t - \omega_g) - T_e \quad (3)$$



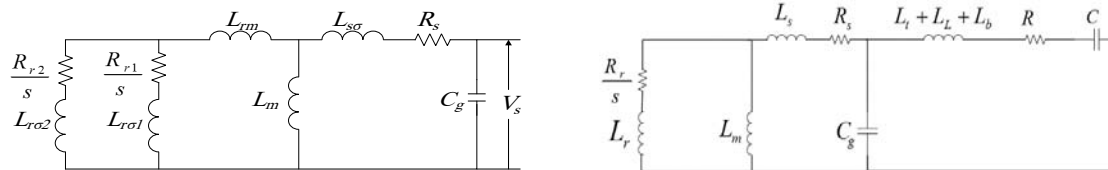
شکل ۲- مدل دو جرمه سیستم پیچشی

### ۳-۱- ژنراتور القایی تک قفسه و دو قفسه

سیستم ژنراتور توربین بادی، انرژی مکانیکی توسط باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. بر اساس چرخش، ژنراتورهای بادی به دو دسته سرعت ثابت و سرعت متغیر تقسیم می‌شوند. ژنراتور توربین بادی سرعت ثابت شامل ژنراتور القایی قفسه سنجابی می‌باشد که مستقیماً به شبکه وصل می‌گردد. لغزش ژنراتور القایی با توان تولید شده تغییر می‌کند. توان تولید شده ژنراتور القایی با افزایش گشتاور اعمالی به شفت آن توسط محرک اولیه افزایش می‌یابد. به علت نبود تحریک خارجی، توان راکتیو توسط ژنراتور تولید نمی‌شود و آن را از شبکه دریافت می‌کند؛ بنابراین برای باقی ماندن میدان مغناطیسی استاتور، همیشه یک منبع خارجی توان راکتیو (بانک خازنی) به ترمینال ژنراتور متصل است. ژنراتور القایی قفسه سنجابی بصورت روتور تک قفسه و دو قفسه طراحی می‌گردد. اکثر ژنراتورهای القایی قفسه سنجابی بالای ۵ کیلووات دارای یک روتور دو قفسه می‌باشند. در مقایسه ژنراتور القایی تک قفسه و دو قفسه می‌توان به گشتاور بهتر ژنراتور القایی دو قفسه برای شروع به کار اشاره



کرد. مدار معادل توالی مثبت ژنراتور القایی تک قفسه و دو قفسه در شکل ۳ نمایش داده شده است. مطابق آن معادلات دیفرانسیل ژنراتور القایی تک قفسه و دو قفسه در قاب مرجع  $d-q$  به ترتیب در روابط (۷)-(۴) و (۹)-(۴) بیان شده است؛ که معادلات شار پیوندی ژنراتور القایی تک قفسه و دو قفسه به ترتیب در معادلات (۱۳-۱۰) و (۱۹-۱۴) آورده شده است. همچنین گشتاور الکترومغناطیسی در ژنراتور القایی تک قفسه و دو قفسه به ترتیب در روابط (۲۰) و (۲۱) آورده شده است [۷]. در روابط (۴) تا (۲۱)،  $\omega_s$  فرکانس سنکرون،  $V_{ds}$  و  $V_{qs}$  ولتاژ ترمینال ژنراتور القایی،  $I_{ds}$  و  $I_{qs}$  جریان سیم‌پیچ‌های استاتور ژنراتور القایی،  $I_{dr1}$  و  $I_{qr1}$  جریان قفسه اول روتور و همچنین  $I_{dr2}$  و  $I_{qr2}$  جریان قفسه دوم روتور در قاب  $d-q$  می‌باشند. همچنین  $R_s$  مقاومت سیم‌پیچ استاتور،  $L_{s\sigma}$  اندوکتانس نشتی غیراشباع استاتور،  $R_{r1}$  مقاومت قفسه اول روتور،  $L_{r1\sigma}$  اندوکتانس نشتی غیراشباع قفسه اول روتور،  $R_{r2}$  مقاومت قفسه دوم روتور،  $L_{r2\sigma}$  اندوکتانس نشتی غیراشباع قفسه دوم روتور،  $L_m$  اندوکتانس مغناطیسی کننده غیراشباع و  $L_{rm}$  اندوکتانس نشتی غیراشباع متقابل بین دو قفسه روتور می‌باشد.



شکل ۳- مدار معادل حالت ماندگار ژنراتور القایی تک قفسه و دو قفسه

$$\frac{d}{dt} \lambda_{ds} = -R_s I_{ds} + \omega_s \lambda_{qs} - V_{ds} \quad (۴)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_{qs} = -R_s I_{qs} + \omega_s \lambda_{ds} - V_{qs} \quad (۵)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_{dr} = -R_r I_{dr} + s \omega_s \lambda_{qr} \quad (۶)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_{qr} = -R_r I_{qr} + s \omega_s \lambda_{dr} \quad (۷)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_{dr2} = -R_r I_{dr2} + s \omega_s \lambda_{qr2} \quad (۸)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_{qr2} = -R_r I_{qr2} + s \omega_s \lambda_{dr2} \quad (۹)$$

$$\lambda_{ds} = L_s I_{ds} + L_m I_{dr} \quad (۱۰)$$

$$\lambda_{qs} = L_s I_{qs} + L_m I_{qr} \quad (۱۱)$$

$$\lambda_{dr} = L_m I_{ds} + L_r I_{dr} \quad (۱۲)$$

$$\lambda_{qr} = L_m I_{qs} + L_r I_{qr} \quad (۱۳)$$

$$\lambda_{ds} = L_s I_{ds} + L_m I_{dr1} + L_m I_{dr2} \quad (۱۴)$$

$$\lambda_{qs} = L_s I_{qs} + L_m I_{qr1} + L_m I_{qr2} \quad (۱۵)$$

$$\lambda_{dr} = L_m I_{ds} + L_{r1} I_{dr1} + L_{r2} I_{dr2} \quad (۱۶)$$

$$\lambda_{qr1} = L_m I_{qs} + L_{r1} I_{qr1} + L_{r2} I_{qr2} \quad (۱۷)$$

$$\lambda_{dr2} = L_m I_{ds} + L_{r2} I_{dr1} + L_{r2} I_{dr2} \quad (۱۸)$$



$$\lambda_{qr2} = L_m I_{qs} + L_{12} I_{qr1} + L_{r2} I_{qr2} \quad (19)$$

$$T_e = L_m [I_{ds} I_{qr} - I_{qs} I_{dr}] \quad (20)$$

$$T_e = L_m [I_{ds} (I_{qr1} + I_{qr2}) - I_{qs} (I_{dr1} + I_{dr2})] \quad (21)$$

### ۳-۲- خط انتقال

معادلات دیفرانسیل مرتبط با خط انتقال شامل خازن موازی و سری در مرجع  $d-q$  در روابط (۲۲) تا (۲۷) بیان شده است [۱۷]. در این روابط،  $V_{bd}$  و  $V_{bq}$  ولتاژ باس بینهایت،  $V_{cd}$  و  $V_{cq}$  ولتاژ دو سر خازن سری و  $I_d$  و  $I_q$  جریان خط انتقال در قاب  $d-q$  می‌باشند. همچنین  $C$  ظرفیت خازن سری،  $C_g$  ظرفیت خازن موازی و  $R_L$  مقاومت خط انتقال می‌باشند.

$$C_g \frac{d}{dt} V_{ds} = I_{ds} - I_d + \omega_s C_g V_{qs} \quad (22)$$

$$C_g \frac{d}{dt} V_{qs} = I_{qs} - I_q + \omega_s C_g V_{ds} \quad (23)$$

$$L \frac{d}{dt} I_d = V_{ds} - R I_d + \omega_s L I_q - V_{cd} - V_{bd} \quad (24)$$

$$L \frac{d}{dt} I_q = V_{qs} - R I_q + \omega_s L I_d - V_{cq} - V_{bq} \quad (25)$$

$$C \frac{d}{dt} V_{cd} = I_d + \omega_s C V_{cq} \quad (26)$$

$$C \frac{d}{dt} V_{cq} = I_q + \omega_s C V_{cd} \quad (27)$$

که  $L$  به صورت رابطه (۲۸) تعریف می‌شود. در این رابطه،  $L_L$  اندوکتانس خط انتقال،  $L_t$  اندوکتانس ترانسفورماتور و  $L_b$  اندوکتانس منبع باس بینهایت می‌باشد.

$$L = L_L + L_t + L_b \quad (28)$$

### ۳-۳- مدل کامل سیستم

با استفاده از بسط تیلور معادلات دیفرانسیل توصیف‌کننده زیرسیستم‌ها را خطی نموده و مدل فضای حالت هر زیرسیستم به صورت روابط (۲۹) تا (۳۱) به دست می‌آید [۷]، [۸].

$$X_T = A_{TT} X_T + A_{TG} X_G + B_T U_T \quad (29)$$

$$X_G = A_{GT} X_T + A_{GG} X_G + A_{GN} X_N \quad (30)$$

$$X_N = A_{NG} X_G + A_{NN} X_N + B_N U_N \quad (31)$$

معادله (۲۹) فضای حالت سیستم پیچشی، معادله (۳۰) فضای حالت ژنراتور القایی و معادله (۳۱) فضای حالت شبکه را نشان می‌دهد.  $X_T$  بردار متغیرهای حالت زیرسیستم پیچشی توربین،  $X_G$  بردار متغیرهای حالت زیرسیستم ژنراتور القایی تک قفسه،  $X_N$  بردار متغیرهای حالت زیرسیستم شبکه،  $U_T$  ورودی زیرسیستم پیچشی توربین و  $U_N$  ورودی‌های زیرسیستم شبکه می‌باشد؛ که متغیرهای حالت و ورودی‌های هر بخش از سیستم در روابط (۳۲)-(۳۶) بیان شده است. در (۳۶) تا (۳۲)،  $\Delta$  بیانگر خطی سازی معادلات می‌باشد.



$$X_T = [\Delta\omega_l, \Delta\delta_{ig}, \Delta\omega_g] \quad (32)$$

$$(33)$$

$$X_G = [\Delta I_{ds}, \Delta I_{qs}, \Delta I_{dr}, \Delta I_{qr}]$$

$$(34)$$

$$X_N = [\Delta V_{ds}, \Delta V_{qs}, \Delta V_d, \Delta V_q, \Delta V_{cd}, \Delta V_{cq}]$$

$$(35)$$

$$u_T = [\Delta T_\omega]$$

$$(36)$$

$$u_N = [\Delta V_{bd}, \Delta V_{bq}]$$

#### ۴- تشدید زیر سنکرون

طبق تعریف، *IEEE* تشدید زیر سنکرون عبارت است از به وجود آمدن شرایطی در سیستم قدرت که با تبادل انرژی بین شبکه الکتریکی و توربین ژنراتور در یک یا چند فرکانس طبیعی سیستم توربین-شفست در زیر فرکانس سنکرون همراه است. امکان تشدید زیر سنکرون در توربین‌های بادی مبتنی بر ژنراتور القایی به دلیل حضور خازن سری در خط انتقال وجود دارد. عمده‌ترین شرایطی که سبب وقوع تشدید زیر سنکرون می‌شوند، عبارت‌اند از اثر خود تحریکی ناشی از اثر ژنراتور القایی، تداخل پیچشی و تقویت گشتاور گذرا. جبران‌سازی سری خطوط باعث تحریک و ایجاد جریان‌های زیر سنکرون با فرکانس طبیعی خط ( $f_{er}$ ) می‌شود که به صورت رابطه (۳۷) نشان داده می‌شود. در این رابطه،  $X_c$  راکتانس خازن سری،  $X_N$  راکتانس خط که شامل راکتانس ژنراتور و ترانسفورماتور نیز می‌باشد؛ و  $f_0$  فرکانس نامی سیستم می‌باشد. با توجه به اینکه  $X_C < X_N$  می‌باشد بنابراین  $f_{er} < f_0$  است و به همین دلیل است که آن را فرکانس زیر سنکرون نیز می‌نامند. این جریان‌های زیر سنکرون در خط، باعث ایجاد جریان و گشتاورهای با فرکانس مکمل ( $f_r$ ) در روتور می‌گردد که به صورت رابطه (38) نشان داده می‌شود [۱۳]، [۱۱].

$$f_{er} = f_0 \sqrt{\frac{X_c}{X_N}} \quad (37)$$

$$f_r = f_0 \pm f_{er} \quad (38)$$

#### ۴-۱- اثر ژنراتور القایی

اثر ژنراتور القایی مرتبط با دینامیک سیستم الکتریکی می‌باشد و قسمت مکانیکی هیچ نقشی در آن ندارد. این پدیده الکتریکی در فرکانسی نزدیک به فرکانس شبکه و در سیستم‌های قدرت با درجه جبران‌سازی بالا اتفاق می‌افتد. در واقع اثر ژنراتور القایی به دلیل خود تحریکی سیستم الکتریکی ایجاد شده است. مقاومت روتور دیده شده از دید ترمینال استاتور در جریان‌های زیر سنکرون منفی است. در همین جریان‌ها، شبکه دارای مقاومت مثبت است. سیستم زمانی ناپایدار خواهد شد که اندازه مقاومت منفی ژنراتور بزرگ‌تر از مقاومت شبکه شود. در این حالت اثر ژنراتور القایی رخ خواهد داد. [۱۳]-[۱۱].



#### ۴-۲- تداخل پیچشی

جریان‌های زیر سنکرون استاتور ژنراتور، باعث ایجاد میدان‌های مغناطیسی با سرعت زاویه‌ای  $2\pi f_{er}$  در فاصله هوایی ماشین می‌گردد. برآیند این میدان‌ها با میدان اصلی باعث ایجاد گشتاورهای القایی در محور روتور با فرکانس‌های زیر سنکرون ( $f_{0-f_{er}}$ ) و فوق سنکرون ( $f_{0+f_{er}}$ ) می‌گردد. اگر حداقل یکی از فرکانس‌های مدهای پیچشی ( $f_n$ ) (فرکانس‌های طبیعی شفت ژنراتور) به فرکانس مکمل زیر سنکرون نزدیک باشد، تداخل پیچشی صورت می‌گیرد. در واقع تداخل پیچشی یک شرایط ناپایدار به صورت تبادل انرژی بین سیستم الکتریکی و شفت ژنراتور است. این پدیده می‌تواند باعث پیچ‌خوردگی شفت ژنراتور یا حتی شکسته شدن آن شود [۱۳]-[۱۱].

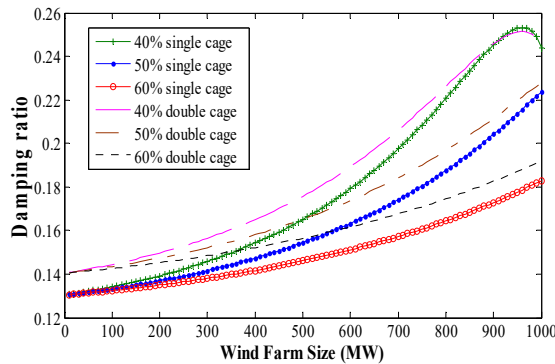
#### ۴-۳- تقویت گشتاور

این حالت وقتی اتفاق می‌افتد که عیبی در سیستم جبران شده سری خازنی روی داده و سپس برطرف شود که منجر به ذخیره شدن مقدار زیادی انرژی در بانک‌های خازنی می‌گردد. بانک‌های خازنی انرژی ذخیره شده را به فرم جریان‌های زیر سنکرون توسط ژنراتور تخلیه می‌کنند. در حالتی که فرکانس مکمل این جریان‌ها با فرکانس طبیعی محور ژنراتور یکی باشد نوسانات ممکن است خیلی سریع زیاد شده و در مدت زمان کمی (۱/۰ ثانیه) به سطح مخرب برسند. [۱۳]-[۱۱].

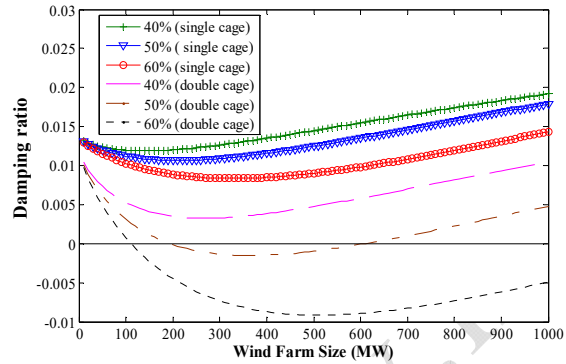
#### ۵- تحلیل سیگنال کوچک

این روش به‌طور گسترده برای تحلیل تداخل پیچشی و اثر ژنراتور القایی استفاده می‌گردد. در تحلیل تشدید زیر سنکرون، مقادیر ویژه مرتبط با اثر ژنراتور القایی و تداخل پیچشی همان مد زیر سنکرون و مد پیچشی می‌باشند. در این تحلیل دو مد ذکر شده دارای کمترین میرایی می‌باشند. با استفاده از معادلات دیفرانسیل هر زیر بخش سیستم مورد مطالعه، فضای حالت خطی سیستم از طریق آنالیز مودال خطی محاسبه گردیده است و مقادیر ویژه سیستم محاسبه شده است. شکل ۴ نسبت میرایی مد زیر سنکرون به ازای سطوح جبران‌سازی سری ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد برای ظرفیت‌های مختلف مزرعه بادی ۱۰ تا ۱۰۰۰ مگاوات را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ظرفیت مزرعه بادی ابتدا نسبت میرایی کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش سطح جبران‌سازی سری در یک ظرفیت مشخص از مزرعه بادی نسبت میرایی مد زیر سنکرون کاهش یافته است اما هیچ‌گونه ناپایداری رخ نداده است. قابل ذکر است که نسبت میرایی مد زیر سنکرون برای جبران‌سازی‌های ۵۰ و ۶۰ درصد در مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دو قفسه در بعضی از ظرفیت‌های مزرعه بادی ناپایدار شده‌اند. این در حالی است که نسبت میرایی مد زیر سنکرون در هیچ کدام از سطوح جبران‌سازی سری ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد در مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتور القایی تک قفسه ناپایدار نشده‌اند. شکل ۵ تأثیر افزایش سطح جبران‌سازی سری و ظرفیت مزرعه بادی بر نسبت میرایی مد پیچشی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش ظرفیت مزرعه بادی (۱۰۰-۱۰۰۰)، نسبت میرایی مد پیچشی به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش سطح جبران‌سازی سری (۴۰، ۵۰، ۶۰) نسبت میرایی مد پیچشی کاهش یافته، اما در هیچ ظرفیتی از مزرعه بادی ناپایدار نمی‌گردد. طبق تعریف، سطح جبران‌سازی که مد زیر سنکرون وارد ناحیه ناپایداری (نسبت میرایی منفی) می‌شود را سطح جبران‌سازی بحرانی می‌نامند و تعیین‌کننده شروع اثر خود تحریکی ژنراتور القایی (IGE) و ناپایداری سیستم می‌باشد؛ بنابراین با توجه به این تحلیل در مزارع بادی مبتنی بر ژنراتور القایی تک قفسه و دو قفسه متصل به خط انتقال جبران شده با خازن سری بحرانی‌ترین مد سیستم مد زیر سنکرون است و تحلیل آن ضروری می‌باشد.



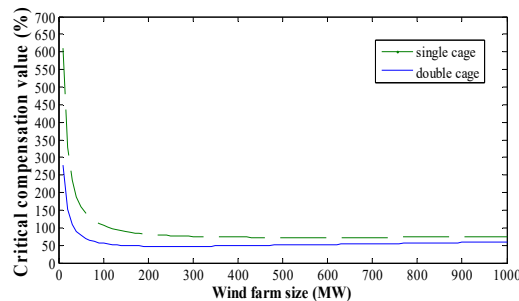


شکل ۵- نسبت میرایی مد پیچشی دز ظرفیت‌های مختلف مزرعه بادی



شکل ۴- نسبت میرایی مد زیر سنکرون در ظرفیت‌های مختلف مزرعه بادی

سطح جبران‌سازی سری بحرانی برای ظرفیت‌های مختلف مزرعه بادی برحسب درصد در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به این شکل در مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتور القایی تک قفسه در ظرفیت‌های پایین مزرعه بادی، سطح جبران‌سازی بحرانی بالا بوده و در این ظرفیت‌ها مشکل ناپایداری در سطوح جبران‌سازی واقعی سیستم (۶۰-۵۰ درصد) وجود ندارد؛ اما در ظرفیت‌های بالای مزرعه بادی سطح جبران‌سازی سری پایین بوده و بررسی آن ضروری می‌باشد. درحالی‌که در مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دو قفسه در سطوح جبران‌سازی واقعی سیستم مشکل ناپایداری وجود دارد و بررسی آن ضروری می‌باشد؛ بنابراین اثر پارامترهای ژنراتور القایی و خط انتقال بر سطح جبران‌سازی سری بحرانی به ازای ۱/۵ و ۱ برابر سطح نامی این پارامترها در شکل ۷ تا شکل ۱۵ نشان داده شده است. شکل ۷ اثر مقاومت استاتور را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل در مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتور القایی تک قفسه و دو قفسه در ظرفیت‌های مختلف، با افزایش مقاومت استاتور، سطح جبران‌سازی سری بحرانی نیز افزایش می‌یابد. در مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتور القایی تک قفسه در سطوح جبران‌سازی واقعی هیچ‌گونه مشکل ناپایداری وجود ندارد اما در مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دو قفسه در سطوح جبران‌سازی واقعی مشکل ناپایداری وجود دارد. همچنین در شکل ۸ که اثر راکتانس استاتور را نشان می‌دهد، با افزایش راکتانس استاتور، سطح جبران‌سازی سری بحرانی نیز افزایش می‌یابد. در این شکل نیز پیداست که مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دو قفسه در جبران‌سازی واقعی مشکل پایداری دارد. شکل ۹ اثر راکتانس مغناطیس‌کننده بر سطح جبران‌سازی سری بحرانی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که اثر راکتانس مغناطیس‌کننده بر سطح جبران‌سازی سری بحرانی ناچیز می‌باشد. در مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دو قفسه در سطوح جبران‌سازی ۵۰ درصد به بالا مشکل ناپایداری وجود دارد.



شکل ۶- سطح جبران‌سازی سری بحرانی به ازای ظرفیت‌های مختلف



مجموعه مقالات دهمین همایش ملی انرژی‌های تجدیدپذیر، پاک و کارآمد

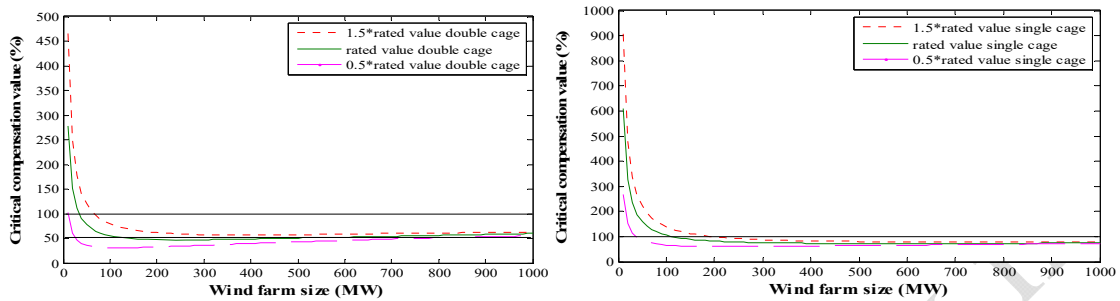
دوم دی ماه ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

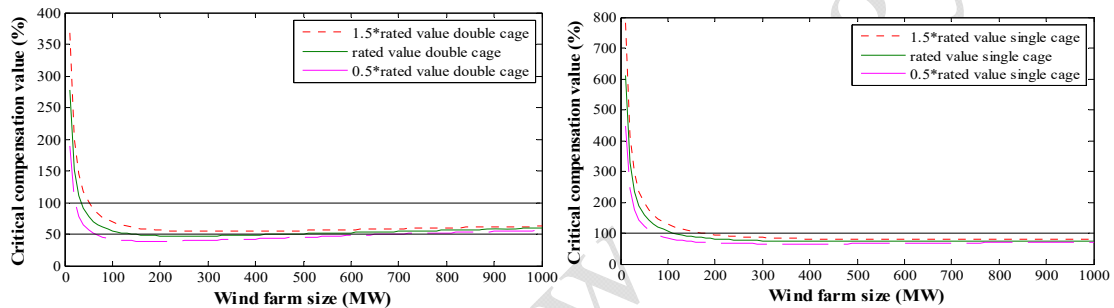
مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم‌اندیشان انرژی‌های شیمیایی

ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام ISC

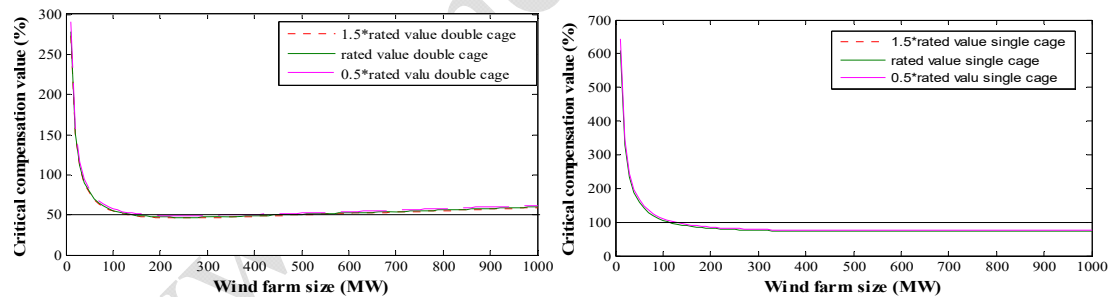
www.Renewenergy.ir



شکل ۷- اثر مقاومت استاتور بر سطح جبران‌سازی سری بحرانی به ازای ظرفیت‌های مختلف

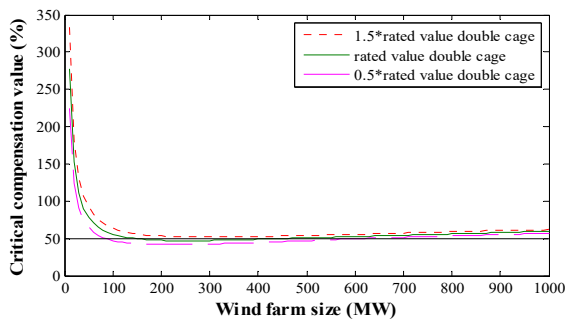


شکل ۸- اثر راکتانس استاتور بر سطح جبران‌سازی سری بحرانی به ازای ظرفیت‌های مختلف

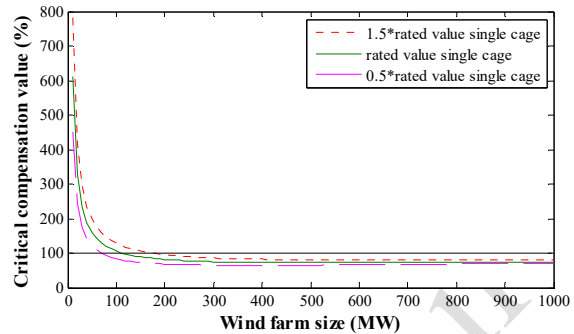


شکل ۹- اثر راکتانس مغناطیس‌کننده بر سطح جبران‌سازی سری بحرانی به ازای ظرفیت‌های مختلف

در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ به ترتیب اثر راکتانس روتور (تک قفسه) و راکتانس متقابل بین دو قفسه روتور (دو قفسه) بر سطح جبران‌سازی سری بحرانی نمایش داده شده است. با توجه به هر دو شکل، افزایش راکتانس روتور و راکتانس متقابل بین دو قفسه روتور باعث افزایش ناچیز سطح جبران‌سازی سری بحرانی شده است. با توجه به شکل ۱۱ در مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دو قفسه در سطوح جبران‌سازی واقعی مشکل ناپایداری وجود دارد.

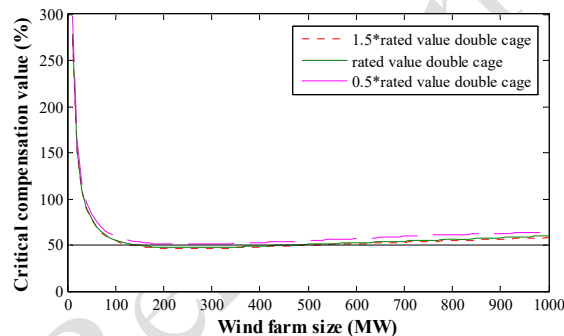


شکل ۱۱- اثر راکتانس متقابل بین دو قفسه روتور بر سطح جبران‌سازی سری بحرانی به ازای ظرفیت‌های مختلف (دو قفسه)



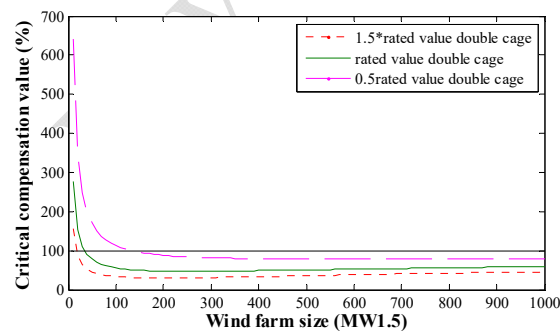
شکل ۱۰- اثر راکتانس روتور بر سطح جبران‌سازی سری بحرانی به ازای ظرفیت‌های مختلف (تک قفسه)

شکل ۱۲ اثر راکتانس قفسه دوم روتور بر سطح جبران‌سازی سری بحرانی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل افزایش راکتانس قفسه دوم روتور باعث کاهش سطح جبران‌سازی سری به مقدار ناچیزی شده است. اگرچه با افزایش ظرفیت مزرعه بادی تغییر نه چندان زیادی داشته‌ایم اما بازهم در سطوح جبران‌سازی واقعی مشکل ناپایداری داریم.

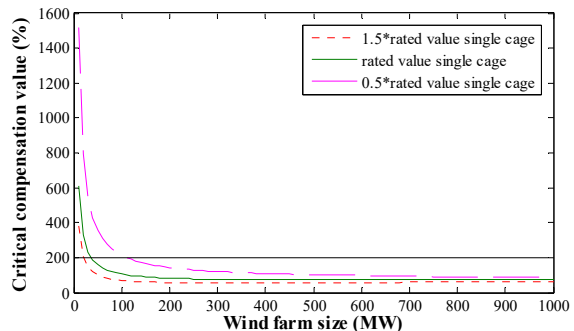


شکل ۱۲- اثر راکتانس قفسه دوم روتور بر سطح جبران‌سازی سری بحرانی به ازای ظرفیت‌های مختلف (دو قفسه)

شکل ۱۳ و ۱۴ به ترتیب اثر مقاومت روتور (ژنراتور القایی تک قفسه) و اثر مقاومت قفسه اول روتور (ژنراتور القایی دو قفسه) را نشان می‌دهد. با توجه به این دو شکل مشاهده می‌شود که با افزایش مقاومت، سطح جبران‌سازی سری بحرانی کاهش چشم‌گیری داشته است.



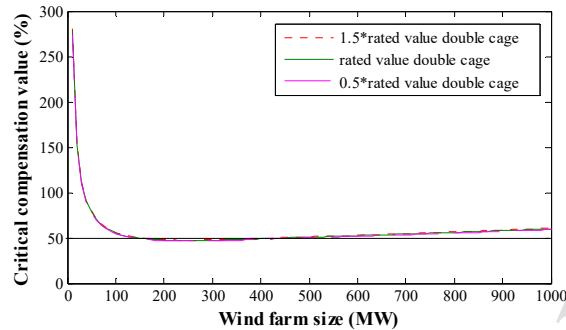
شکل ۱۴- اثر مقاومت قفسه اول روتور بر سطح جبران‌سازی سری



شکل ۱۳- اثر مقاومت روتور بر سطح جبران‌سازی سری بحرانی به

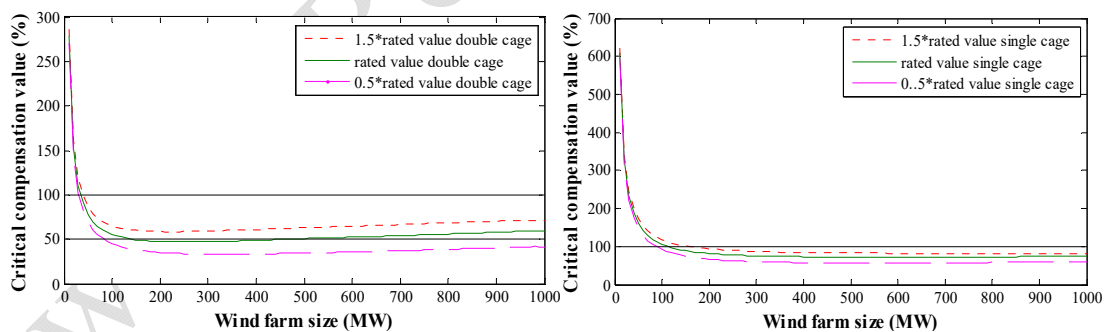


ازای ظرفیت‌های مختلف (تک قفسه) بحرانی به ازای ظرفیت‌های مختلف (دو قفسه)  
 شکل ۱۵ اثر مقاومت قفسه دوم روتور بر سطح جبران‌سازی سری بحرانی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست افزایش مقاومت قفسه دوم روتور بر سطح جبران‌سازی سری بحرانی تقریباً تأثیر بسیار کمی دارد. این نکته قابل‌ذکر است که در اینجا نیز با افزایش ظرفیت مزرعه بادی در سطوح جبران‌سازی واقعی مشکل ناپایداری وجود دارد.

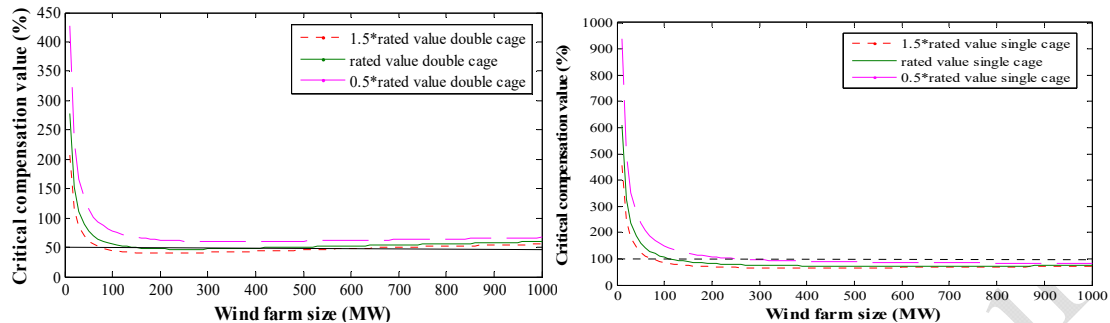


شکل ۱۵- اثر مقاومت قفسه دوم روتور بر سطح جبران‌سازی سری بحرانی به ازای ظرفیت‌های مختلف (دو قفسه)

شکل ۱۶ اثر مقاومت خط انتقال بر سطح جبران‌سازی بحرانی را نمایش می‌دهد. مطابق این شکل، افزایش مقاومت خط انتقال، باعث افزایش سطح جبران‌سازی سری بحرانی می‌گردد. در مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتور القایی تک قفسه با افزایش ظرفیت مزرعه بادی، سطح جبران‌سازی سری بحرانی به مقدار ناچیزی افزایش می‌یابد؛ اما در مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دو قفسه با افزایش ظرفیت مزرعه بادی، سطح جبران‌سازی سری بحرانی به مقدار چشم‌گیری افزایش می‌یابد؛ اما همچنان مشکل ناپایداری وجود دارد. مطابق شکل ۱۷، افزایش راکتانس خط انتقال (ضعیف‌تر شدن خط) باعث کاهش سطح جبران‌سازی سری بحرانی سیستم می‌شود. اثر راکتانس خط انتقال بر سطح جبران‌سازی سری بحرانی در مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتور القایی تک قفسه و دو قفسه در شکل ۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۱۶- اثر مقاومت خط انتقال بر سطح جبران‌سازی سری بحرانی به ازای ظرفیت‌های مختلف



شکل ۱۷- اثر راکتانس خط انتقال بر سطح جبران‌سازی سری بحرانی به ازای ظرفیت‌های مختلف

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک تحلیل کامل از تشدید زیر سنکرون برای ظرفیت‌های مختلف مزرعه بادی تک قفسه و دو قفسه از ۱۰ تا ۱۰۰۰ مگاوات ارائه گردید. با توجه به تحلیل انجام‌شده مشاهده می‌شود که با افزایش ظرفیت مزرعه بادی، نسبت میرایی مد پیش‌بینی افزایش اما نسبت میرایی مد زیر سنکرون ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتور القایی تک قفسه پایداری خود را حفظ می‌کند و در سطوح جبران‌سازی واقعی (۶۰٪-۴۰٪) تشدید زیر سنکرون رخ نمی‌دهد؛ اما در مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دو قفسه در سطوح جبران‌سازی واقعی مشکل ناپایداری وجود دارد. همچنین با افزایش سطح جبران‌سازی سری در یک ظرفیت مشخص از مزرعه بادی نسبت میرایی مد زیر سنکرون کاهش یافته است. در ظرفیت‌های بالای مزرعه بادی سطح جبران‌سازی سری بحرانی پایین بوده و بررسی آن ضروری می‌باشد. برای بررسی این موضوع از یک الگوریتم برای محاسبه‌ی سطح جبران‌سازی سری بحرانی سیستم استفاده شده است و اثر پارامترهای مختلف سیستم بر روی آن مورد مطالعه قرار گرفته است. این مطالعه نشان می‌دهد که پارامترهای روتور، استاتور و خط انتقال بیشترین اثر را بر روی سطح جبران‌سازی سری بحرانی دارند. به طوری که با افزایش راکتانس خط انتقال، مقاومت روتور (ژنراتور القایی تک قفسه) و مقاومت قفسه اول روتور (ژنراتور القایی دو قفسه)، با کاهش سطح جبران‌سازی سری روبرو خواهیم شد؛ اما افزایش مقاومت خط انتقال، راکتانس استاتور، راکتانس روتور، راکتانس متقابل بین دو قفسه و مقاومت استاتور باعث افزایش سطح جبران‌سازی سری بحرانی می‌شوند.

## پیوست

### اطلاعات سیستم‌های مورد مطالعه

۸۹۲/۴	توان مینا (مگاوات آمپر)	۰/۰۰۷۲	مقاومت روتور
۵۰۰	ولتاژ مینا (کیلوولت)	۰/۱۰۱۵	راکتانس روتور
۰/۱۴	راکتانس ترانس	۳/۲۳۶۶	راکتانس مغناطیس کننده
۰/۰۲	مقاومت خط انتقال	-	-
۰/۰۶	راکتانس باس بینهایت	-	-
۰/۵۰	راکتانس خط انتقال	-	-

ژنراتور القایی تک قفسه ۲/۳ مگاوات		توربین بادی ۲/۳ مگاوات	
توان نامی	۲/۳ مگاوات	اینرسی توربین بادی	۴
ولتاژ نامی	۶۹۰ ولت	اینرسی ژنراتور	۰/۵
فرکانس نامی	۶۰ هرتز	سختی بین توربین بادی و ژنراتور	۰/۳
مقاومت استاتور	۰/۰۰۵۶۰۴	میرایی بین توربین بادی و ژنراتور	.
راکتانس استاتور	۰/۱۰۹۸	خط انتقال	

مجموعه مقالات دهمین همایش ملی انرژی‌های تجدیدپذیر، پاک و کارآمد

دوم دی ماه ۱۳۹۵، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم‌اندیشان انرژی‌های نو

ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام ISC

www.Renewenergy.ir



مقاومت قفسه دوم روتور	۰/۰۱۹۲۳۹	ولتاژ مبنا (کیلو ولت)	۵۰۰
راکتانس قفسه اول روتور	۰	راکتانس ترانس	۰/۱۴
راکتانس قفسه دوم روتور	۰/۲۱۱۷۲	مقاومت خط انتقال	۰/۰۲
راکتانس متقابل دو قفسه	۰/۰۷۲۱۷۵	راکتانس باس بینهایت	۰/۰۶
راکتانس مغناطیسی کننده	۳/۸۸۹۲	راکتانس خط انتقال	۰/۵۰

توربین بادی ۲/۳ مگاوات	توربین بادی ۲/۳ مگاوات	توربین بادی ۲/۳ مگاوات	توربین بادی ۲/۳ مگاوات
اینرسی توربین بادی	۴	اینرسی توربین بادی	۰/۵
اینرسی ژنراتور	۰/۵	اینرسی ژنراتور	۰/۳
سختی بین توربین بادی و ژنراتور	۰/۳	سختی بین توربین بادی و ژنراتور	۰
میرایی بین توربین بادی و ژنراتور	۰/۰۰۵۰۶	میرایی بین توربین بادی و ژنراتور	۰
خط انتقال	۰/۱۳۱۷۶	خط انتقال	۰/۱۳۱۷۶
توان مبنا (مگاوات آمپر)	۰/۰۱۱۹۹	توان مبنا (مگاوات آمپر)	۸۹۲/۴

### مراجع

- [1] T. Ackerman, Wind Power in Power Systems. Wiley, 2005.
- [2] A. Lara, N. Jenkins, J. Ekanayake and P. Cartwright, Wind Energy Generation: Modeling and Control. Wiley, 2009.
- [3] <http://www.gwec.net/>, Global wind energy outlook, accessed Oct. 2014.
- [4] V. Akhmatov, Induction Generators for Wind Power. Multi Science, 2007.
- [5] K. Padiyar, Analysis of subsynchronous resonance in power system. Kluwer Academic, 1999.
- [6] A. Moharana and R.K Varma, "SSR Alleviation by STATCOM in Induction-Generator-Based Wind Farm Connected to Series Compensated Line" IEEE Trans. Sustainable Energy, Vol. 5, No. 3, pp. 947-957, 2014.
- [7] A. Moharana and R.K. Varma, "Subsynchronous resonance in single cage self-excited-induction-generator-based wind farm connected to series-compensated lines" IET Generation, Transmission, & Distribution., Vol. 5, No. 12, pp. 1221-1232, 2011.
- [8] A. Moharana and R.K. Varma, "Subsynchronous resonance in double-cage self-excited-induction-generator-based wind farm connected to series-compensated lines" IEEE Trans. Power System, Vol. 28, No. 3, pp. 2573-2583, 2013.
- [9] A.E. Leon, J.M. Mauricio and J.A. Solsona, "Subsynchronous resonance mitigation using variable speed wind energy conversion systems" IET Generation, Transmission, & Distribution, Vol. 7, No. 5, pp. 511-525, 2013.
- [10] X. Han, P. Wang and W. Qin, "Transient stability studies of doubly-fed induction generator using different drive train models," Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting. Detroit, pp. 1-6, 2011.
- [11] H.A. Mohammadpour and E. Santi, "Sub-synchronous resonance analysis in DFIG-based wind farms: Definitions and problem identification — Part I," Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Pittsburgh, pp. 812-819, 2014.
- [12] Z. Xu and Z. Pan, "Influence of different flexible drive train models on the transient responses of DFIG wind-turbine," Proc. Int. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Beijing, pp. 1-6, 2011.
- [13] IEEE Committee Report, "Terms, Definitions and Symbols for Subsynchronous Oscillations" IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 104, No. 6, pp. 1326-1334, 1985.
- [14] S.M. Mueeen, J. Tamura and T. Murata, Stability Augmentation of a Grid-connected Wind Farm. Springer, 2009.