

Reactive power distribution strategy with minimum losses in a DFIG wind farm

Ali Kamalinezhad ^{1,*}

¹Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University of Tabriz, East Azerbaijan, Iran

E-mails: alikamalinezhad4@gmail.com

* Corresponding Author

Abstract

An optimal reactive power distribution strategy is proposed to minimize total electrical losses in a wind farm (WF); These losses not only include the losses of transmission cables and transformers of wind turbines (WT), but also include the losses from inside the wind energy production systems. The distribution of reactive power inside a WT takes advantage of the optimal division strategy in the stator and the grid-side converter (GSC), which aims to minimize the overall losses of the wind power generation system; This system includes generator, converters and filters. Optimization problems are formulated based on established models for WT reactive power losses and constraints. A WF is carefully designed and used for case studies. Wake effect is considered in calculating the active power of each WT. Total WF losses are calculated by implementing the proposed strategy and at different wind speeds and with different amounts of reactive power. The simulation results show the effectiveness of the proposed strategy.

Keywords

Doubly fed induction generator, loss minimization, reactive power distribution, wind farm, wake effect.

استراتژی توزیع توان راکتیو با حداقل تلفات در یک مزرعه بادی DFIG

علی کمالی نژاد^{۱*}

گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد تبریز، آذربایجان غربی، ایران

ایمیل نویسنده: alikamalinezhad4@gmail.com

چکیده

یک استراتژی توزیع بهینه توان راکتیو برای به حداقل رساندن مجموع تلفات برقی در یک مزرعه بادی (WF) پیشنهاد می شود؛ این تلفات نه تنها شامل تلفات کابل‌های انتقال و ترانسفورماتورهای توربین های بادی (WT) می شوند بلکه تلفات ناشی از داخل سیستم های تولید انرژی باد را نیز دربرمی گیرند. توزیع توان راکتیو در داخل یک WT از استراتژی تقسیم بهینه در استاتور و مبدل سمت شبکه (GSC) بهره می برد که هدفش به حداقل رساندن تلفات کلی سیستم بادی تولید انرژی می باشد؛ این سیستم شامل ژنراتور، مبدلها و فیلترها می گردد. مسائل بهینه سازی بر اساس مدل‌های ثبت شده برای تلفات و محدودیتهای توان راکتیو WT فرمول بندی می شوند. یک WF با دقت طراحی شده و برای مطالعات موردی استفاده می شود. اثر ویک در محاسبه توان راکتیو هر WT در نظر گرفته شده است. مجموع تلفات WF با اجرای استراتژی پیشنهاد شده و در سرعت های مختلف باد و با مقادیر مختلف توان راکتیو محاسبه می شود. نتایج شبیه سازی نشاندهنده ی اثربخشی استراتژی پیشنهاد شده می باشند.

کلمات کلیدی: ژنراتور القایی با تغذیه دوگانه، به حداقل رساندن تلفات، توزیع توان راکتیو، مزرعه بادی، اثر ویک

نام نویسنده مسئول: علی کمالی نژاد

ایمیل نویسنده مسئول: alikamalinezhad4@gmail.com

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۴

تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۲۰

۱- مقدمه

[۱۴-۱۱]. در مراجع [۱۵-۱۸] روش توزیعی دیگری پیشنهاد شده که تلفات توان راکتیو را در کابل‌های انتقال و ترانسفورماتورهای توربین های بادی در نظر می گیرد. با این وجود این روش نیز تلفات توان راکتیو در سیستم تبدیل انرژی توربین های بادی را لحاظ نمی کند و از طرفی این امر بخش زیادی از مجموع تلفات مزارع بادی را تشکیل می دهد. در واقع، تلاش برای به حداقل رساندن تلفات توان راکتیو در کابل‌های انتقال و ترانسفورماتورها می تواند باعث تلفات بیشتر در سیستم های تبدیل انرژی گردد. یک استراتژی بهینه توزیع در مرجع [۱۹] پیشنهاد شده که تلفات سیستم های تبدیل انرژی باد، ترانسفورماتورها و کابل های انتقال را در نظر گرفته و برای به حداقل رساندن تلفات یک روش توزیع بهینه توان راکتیو پیدا کرده است. با این حال، این استراتژی تنها یک استراتژی ساده را برای کنترل WT به کار می گیرد و اثر توزیع توان راکتیو را در ژنراتور القایی تغذیه دوگانه (DFIG) در سیستم های بادی تولید انرژی لحاظ نمی کند. از آنجاییکه سیستم تولید انرژی DFIG می تواند توان راکتیو بین استاتور و مبدل سمت شبکه (GSC) را تنظیم نماید، جریان توان راکتیو در داخل سیستم بر روی تلفات سیستم اثرگذار خواهد بود. بنابراین، روش کنترل توان راکتیو در سیستم تولید انرژی DFIG باید مورد مطالعه قرار گیرد.

رایج ترین روش، تأمین توان راکتور از جانب استاتور توسط مبدل سمت روتور (RSC) می باشد. این روش می تواند با نزدیک کردن ضریب توان به مقدار یک، بازدهی خوبی را به نمایش بگذارد اما تلفات مس در ژنراتور با افزایش ضریب توان به طور قابل توجهی بالا خواهد رفت. روش دوم تنظیم توان راکتیو، استفاده از RSC و GSC است تا تلفات مسی نیز به حداقل برسند. این روش تلفات ناشی از مبدلها و فیلترها را لحاظ نمی کند [۲۰، ۲۱]. این روش می تواند

باتوجه به رشد روز افزون استفاده از انرژی های تجدید پذیر که بیشتری آنها انرژی خورشیدی و بادی می باشد، مطالعات زیادی در این خصوص انجام شده است. با افزایش یکپارچه سازی انرژی باد در سیستم قدرت، برای تأمین توان راکتیو مورد نیاز جهت پشتیبانی از شبکه به مزارع بادی (WFs) نیاز است. مزارع بادی به عنوان یک سرویس جانبی می توانند توان راکتیو سیستم قدرت را فراهم آورند. یک راه حل تأمین توان راکتیو به کار گرفتن منابع اضافی برای جبران توان راکتیو می باشد [۴-۱]. از آنجاییکه توربین های بادی (WTs) با مبدل‌های الکترونیکی قدرت که نقشی حیاتی در سیستم های انرژی تجدیدپذیر بازی می کنند و به تازگی تحقیقات بسیاری بر روی آنها انجام شده است [۵-۷]، قابلیت تنظیم توان راکتیو را دارند، بهره گیری از آنها برای تأمین سرویس کمکی توان راکتیو مقرون به صرفه می باشد. اپراتور سیستم قدرت، مرجع توان راکتیو را در نقطه کولپینگ مشترک (PCC)^۱ یک مزرعه بادی وارد می کند. سپس اپراتور WF توان راکتیو هر WT را محاسبه کرده و برای آن توربین توزیع می نماید. توان راکتیو توزیع شده در میان مزارع بادی بر روی بازدهی کل سیستم تأثیرگذار خواهد بود و به همین علت باید با دقت مورد مطالعه قرار گیرد [۸-۱۰].

رایج ترین استراتژی توزیعی که مورد استفاده قرار می گیرد، توزیع تناسبی است که توان راکتیو مورد نیاز در توربین های بادی را متناسب با میزان توان راکتیو موجودشان توزیع می کند. اجرای این روش ساده است و احتمال فراتر رفتن از حد توان راکتیو در هر توربین بادی تقریباً بعید می باشد. با این وجود در این روش میزان تلفات توان راکتیو در مزرعه بادی در نظر گرفته نمی شود

¹ Point of Common Coupling

نشستی و اندوکتانس های متقابل استفاده می شوند و همچنین d و q برای محورهای مستقیم و تربیعی می باشند. بالانویس (') برای مقدار روتور با مرجعیت استاتور استفاده می شود.

در یک سرعت ثابت باد، جریان محور d روتور ثابت است و به شکل زیر محاسبه می گردد:

$$I'_{rd} = -\frac{X_s \omega_s}{V_s X_m \omega_r} P_{mec} \quad (2)$$

$$I_{rd} = u I'_{rd} \quad (3)$$

که در آن P_{mec} توان استخراج شده از باد، ω_r فرکانس زاویه ای ولتاژها و جریان های سیم پیچی های روتور، ω_s فرکانس زاویه ای ولتاژها و جریان های سیم پیچی های استاتور و u نسبت دور می باشند.

$$I_{sq} = Q_s / V_s \quad (4)$$

که در آن Q_s توان راکتیو استاتور می باشد.

با استفاده از معادله ۱، جریان محور d روتور و جریان محور d استاتور را می توان به شکل زیر محاسبه نمود:

$$I'_{rq} = -A I'_{rd} - \frac{1}{B X_m} I_{sq} - \frac{V_s}{X_m} \quad (5)$$

$$I_{rq} = u I'_{rq} \quad (6)$$

$$I_{sd} = B [-X_m I'_{rd} + A X_m I'_{rq} + A V_s] \quad (7)$$

که در آن $B = X_s / (X_s^2 + R_s^2)$ ، $A = R_s / X_s$

تلفات مسی در DFIG را می توان با استفاده از معادله ی زیر محاسبه نمود:

$$P_{Cu} = R_s (I_{sd}^2 + I_{sq}^2) + R_r (I_{rd}^2 + I_{rq}^2) \quad (8)$$

ب) مدل تلفات مبدلها و فیلتر

تلفات در مبدل که شامل ترانزیستورها و دیودهای معکوس می گردد، را می توان به دو دسته تلفات کلیدزنی و هدایت تقسیم نمود. بر طبق مرجع های ۳ و ۲۱، تلفات موجود در مبدل را می توان به صورت زیر نمایش داد:

$$P_{loss} = a_1 I_{rms}^2 + b_1 I_{rms}^2 \quad (9)$$

که در آن I_{rms} مقدار rms جریان سینوسی در پایه ی ac مبدل است، a_1 و b_1 ثابت های ماژول توان هستند و برابرند با:

$$a_1 = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} \left(V_{IGBT} + \frac{E_{ON} + E_{OFF}}{I_{C,nom}} f_{sw} + \frac{E_{rrr}}{I_{C,nom}} f_{sw} \right) \quad (10)$$

$$b_1 = 3r_{IGBT} \quad (11)$$

در این معادله V_{IGBT} ولتاژ کلکتور به امیتر IGBT می باشد، $E_{ON} + E_{OFF}$ تلفات روشن و خاموش شدن IGBT ها، $I_{C,nom}$ جریان نامی کلکتور IGBT، f_{sw} فرکانس کلیدزنی، E_{rrr} تلفات خاموشی دیودها (بازیابی معکوس)، r_{IGBT} مقاومت هدایتی IGBT می باشند.

شارهای جریان RSC³ و GSC به شکل زیر محاسبه می شوند:

$$I_{rms}^{RSC} = \sqrt{I_{rd}^2 + I_{rq}^2} \quad (12)$$

$$I_{rms}^{GSC} = \sqrt{I_{gd}^2 + I_{gq}^2}$$

جریان محور d مبدل سمت شبکه I_{gd} به شکل زیر قابل محاسبه می شود:

$$I_{gd} = (I_{rd} V_{rd} + I_{rq} V_{rq}) / V_s \quad (13)$$

با انتخاب های خاصی از مرجع توان راکتیو به تلفات کمتری برسد اما در باقی حالات، مجموع تلفات افزایش خواهد یافت. مرجع عای [۲۳،۲۲] روشی را پیشنهاد می کنند که در آن برای داشتن حداقل تلفات در ژنراتور و مبدلها، بار توان راکتیو بین RSC و GSC تقسیم می شود. نسبت تقسیم پی در پی محاسبه شده و یک مجموعه جدول را شکل می دهد. در فرآیند کنترل، کنترل کننده باید به جدول ها نگاه کرده و جریانهای بهینه برای توان راکتیو را تعیین نماید. همانطور که در بالا ذکر شد، توزیع بهینه توان راکتیو مزارع بادی نه تنها باید تلفات در سیستم انتقال را در نظر بگیرد بلکه باید تلفات سیستم بادی تولید انرژی را نیز در نظر داشته باشد؛ این امر به استراتژی کنترلی توربین های بادی ربط پیدا می کند. روش های توزیع تناسبی و استراتژی توزیع با حداقل تلفات انتقالی هر دو از استراتژی های بسیار رایج در کنترل توربین بادی هستند که نسبت به استراتژی پیشنهاد شده در مرجع های [۲۵،۲۴] تلفات بالاتری در توربین های بادی دارند.

در این مقاله، استراتژی توزیع بهینه توان راکتیو برای به حداقل رساندن تلفات کل پیشنهاد می شود، این استراتژی نه تنها شامل تلفات کابلهای انتقالی و ترانسفورماتورهای WT می گردد، بلکه تلفات داخلی سیستم بادی تولید انرژی را نیز در بر می گیرد. کنترل توان راکتیو WT از استراتژی تقسیم بهینه در RSC و GSC استفاده می کند که با حل مسئله بهینه سازی اجرا می شود؛ هدف این استراتژی به حداقل رساندن مجموع تلفات ناشی از ژنراتور، مبدل ها و فیلتر می باشد. در نتیجه، توزیع توان راکتیو بین توربین های بادی با استراتژی کنترل بهینه توان راکتیو در توربین های بادی ادغام می شود. سپس استراتژی پیشنهاد شده با استراتژی های قدیمی توزیع در حالات مختلف مقایسه می گردد.

ادامه ی مقاله به شرح زیر چیدمان شده است: بخش ۲ مدل های تلفات مزرعه بادی را نشان می دهد. بخش ۳ استراتژی های توزیع تناسبی توان راکتیو را مورد مطالعه قرار داده و بخش ۴ فرمولاسیون استراتژی توزیع پیشنهاد شده را بیان می کند. اثر این استراتژی ها در بخش ۵ محاسبه و تحلیل می شود. در نهایت در بخش ۶ نیز نتایج را خواهیم داشت.

۱. مدل های تلفات مزرعه بادی

توربین های بادی و کابلها اصلی ترین عوامل ایجاد تلفات در یک مزرعه بادی هستند. تلفات توان یک توربین بادی شامل تلفات اصطکاک در قسمت مکانیکی، تلفات هسته و تلفات مسی در DFIG، تلفات مبدلها و فیلتر و تلفات ترانسفورماتور توربین می گردد. تلفات اصطکاک و تلفات هسته در یک نقطه عملیاتی مشخص می توانند ثابت در نظر گرفته شوند. بنابراین، در این مقاله در نظر گرفته نمی شوند. در پاراگراف های بعدی، مدل های تلفات هر یک از مؤلفه ها استنتاج می گردد.

الف) مدل تلفات DFIG

برای یک DGIG در حال کار با ولتاژ استاتور و حول چارچوب مرجع، معادلات ولتاژ حالت پایدار به شرح زیر خواهند بود. تمام متغیرهای موجود در معادلات بر اساس سیستم پرونیته^۲ بیان می شوند.

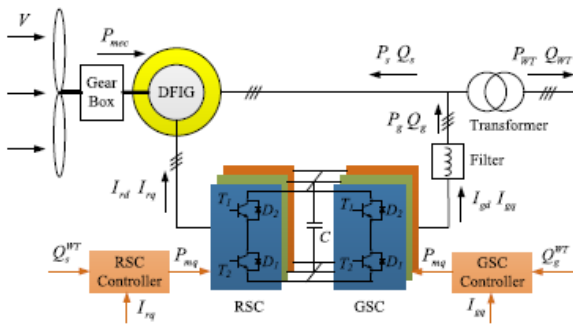
$$\begin{bmatrix} V_s \\ 0 \\ V'_{rd} \\ V'_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -X_s & 0 & -X_m \\ X_s & R_s & X_m & 0 \\ 0 & -sX_m & R'_r & -sX'_r \\ sX_m & 0 & sX'_r & R'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I'_{rd} \\ I'_{rq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن اندوکتانس استاتور X_s برابر است با $X_{ls} + X_m$ ، اندوکتانس روتور X'_r برابر است با $X_{lr} + X_m$ ، X_{ls} اندوکتانس نشستی استاتور، X_{lr} اندوکتانس متقابل، X'_{lr} اندوکتانس نشستی روتور، s لغزش روتور می باشند. اندیس های r و s به ترتیب استاتور، روتور و مدارهای مبدل شبکه هستند، l و m برای نشان دادن

³ Rotor Side Converter (RSC)

² per unit (pu)

از طریق مقادیر مرجع خود Q_g^{WT} و Q_s^{WT} توسط کنترلر RSC و کنترلر GSC، کنترل شوند.



شکل ۲. نمونه ای از کنترل شارهای توان و توان راکتیو در داخل یک DFIG WT

(۱) $Q_g^{WT} = 0$ ، در استراتژی قدیمی کنترل توربین بادی، تابع GSC برابر است با انتقال لغزش توان اکتیو از/به شبکه برای اطمینان حاصل کردن زا ثابت بودن ولتاژ لینک dc؛ در نتیجه خروجی توان راکتیو تنها با کنترل می شود. RSC معمولاً در ولتاژ استاتور حول بردار کنترلی عمل می کند که در آن جریان محور q، I_{rq} ، توان تحریک را کنترل می نماید. Q_s می تواند با کنترل I_{rq} تنظیم شود. مرجع I_{rq} با استفاده از معادلات ۴ تا ۶ یا از طریق کنترل کننده ی PI قابل محاسبه می باشد. در این مقوله ی کنترلی، Q_g^{WT} برابر صفر و Q_s^{WT} برابر با Q_{ref}^{WT} خواهد بود.

(۲) دامنه ی توان راکتیو: دامنه Q_s عمدتاً از طریق دو پارامتر تعیین می گردد: جریان سمت روتور، I_r ، و جریان سمت استاتور، I_s . جریان سمت روتور معمولاً با جریان اسمی RSC محدود می گردد، در حالیکه حد جریان سمت استاتور با حد حرارتی رسانای استاتور تعیین می شود. جریان اسمی مبدلها برابر است با:

$$I_{con}^{rated} = \frac{I_{C, nom} / \sqrt{2}}{1 + \delta} \quad (22)$$

که در آن δ ضریب ایمنی مبدل می باشد. جریان استاتور به شکل زیر قابل محاسبه است:

$$I_s = \sqrt{I_{sd}^2 + I_{sq}^2} \quad (23)$$

بنابراین برای دامنه ی Q_s خواهیم داشت:

$$I_{RSC}^{rms} \leq I_{RSC}^{rated} \quad (24)$$

$$I_s \leq I_s^{rated} \quad (25)$$

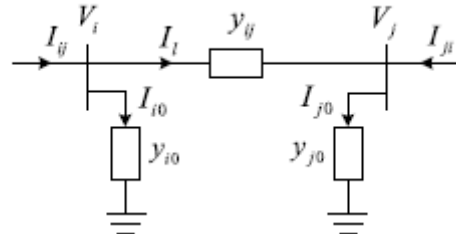
که در آن I_s^{rated} و I_{RSC}^{rated} جریان های اسمی RSC و استاتور هستند. بر طبق کد شبکه بریتانیا^۴، مزارع بادی باید قابلیت تأمین توان راکتیو با دامنه -0.33 pu تا $+0.33$ pu را در توان اکتیو اسمی داشته باشند. بر اساس الزامات کد شبکه، ما I_s را با سرعت های مختلف باد و با مرجع های گوناگون توان راکتیو محاسبه نموده و به حداکثر مقدار 0.91 pu برای I_s دست یافتیم. بنابراین، جریان اسمی استاتور، I_{RSC}^{rated} را برابر با 0.91 pu انتخاب می کنیم. مبدل سمت روتور همان طراحی مبدل سمت شبکه را دارد و در آن ضریب ایمنی δ برابر 0.37 انتخاب می شود. بر اساس پارامترهای انتخاب شده و پارامترهای موجود در ضمیمه، قابلیت توان راکتیو سیستم DFIG WT برای ولتاژهای مختلف شبکه در شکل ۳ به نمایش درآمده است. حد جریان سمت روتور برابر با جریان اسمی RSC می باشد. تلفات توان اکتیو و راکتیو در نظر گرفته شده است.

جریان محور q مبدل سمت شبکه I_{gq} به شکل زیر قابل محاسبه می شود:

$$I_{gq} = Q_g / V_s \quad (14)$$

$$Q_g = Q_{WT} - Q_s \quad (15)$$

که در آن Q_g توان راکتیو تأمین شده توسط GSC و Q_{WT} کل توان راکتیو توربین بادی می باشند.



شکل ۱. مدل کابلی برای محاسبه تلفات

با جریان های مبدل سمت شبکه، می توان تلفات فیلتر سمت شبکه را محاسبه نمود:

$$P_{filter}^{loss} = R_{filter} (I_{gd}^2 + I_{gq}^2) \quad (16)$$

بنابراین مجموع تلفات یک توربین بادی برابر است با:

$$P_{WT}^{loss} = P_{Cu} + P_{RSC}^{loss} + P_{GSC}^{loss} + P_{filter}^{loss} \quad (17)$$

ج) مدل تلفات ترانسفورماتورها

تلفات توان اکتیو در ترانسفورماتورها P_{trans}^{loss} با استفاده از معادله زیر به دست می آید:

$$P_{trans}^{loss} = P_0 + \beta^2 P_k \quad (18)$$

که در آن β نسبت بار، P_0 تلفات بی باری و P_k تلفات بار می باشند.

د) مدل تلفات کابلی ها

اتصال کابلهای دو باس i و j را طبق شکل ۱ در نظر بگیرید، که در آن I_0 ادمیتانس و جریان هر کابل می باشند و V ولتاژ هر باس را نشان می دهد. جریان کابل، I_{ij} ، با جهت مثبت از i به j در باس i و z به صورت زیر تعیین می گردد:

$$I_{ij} = I_i + I_{i0} = y_{ij}(V_i - V_j) + y_{i0}V_i \quad (19)$$

به طور مشابه برای جریان کابلی I_{ji} داریم:

$$I_{ji} = -I_i + I_{j0} = y_{ij}(V_j - V_i) + y_{j0}V_j \quad (20)$$

تلفات توان در کابل z برابر است با مجموع جبری توانهای مختلط S_{ij} از باس نو و S_{ji} از باس z و نه

$$S_{ij}^{loss} = S_{ij} + S_{ji} = V_i I_{ij}^* + V_j I_{ji}^* \quad (21)$$

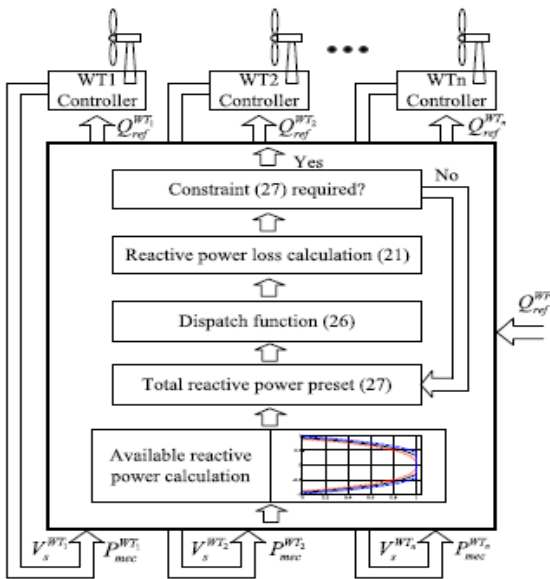
۲. استراتژی های قدیمی توزیع توان راکتیو

این بخش استراتژی قدیمی کنترل توان راکتیو برای یک سیستم DFIG WT و استراتژی های قدیمی توزیع توان راکتیو در یک مزرعه بادی را معرفی می کند.

الف) استراتژی قدیمی کنترل توان راکتیو در یک DFIG WT

یک ساختار معمولی از سیستم DFIG WT در شکل ۲ نشان داده شده است. توان راکتیو خروجی سیستم، Q_{WT} ، ترکیبی است از توان راکتیو سمت استاتور DFIG، Q_s ، و توان راکتیو GSC، Q_g ، و Q_s و Q_g می توانند به ترتیب

⁴ British Grid Code



شکل ۴. پیاده سازی توزیع تناسبی

۳. استراتژی پیشنهادی توزیع توان راکتیو

الف) کنترل بهینه توان راکتیو در یک DFIG WT

روش قدیمی کنترل توان راکتیو توربین های بادی برای تنظیم توان راکتیو استفاده کامل را از GSC نمی برد. در استراتژی کنترل بهینه، GSC توان راکتیو و در کنار آن برای به حداقل رساندن مجموع تلفات داخلی توربین بادی، RSC را نیز تنظیم می نماید. GSC با ولتاژ شبکه حول کنترل برداری عمل می نماید که در آن جریان محور q ، I_{gq} به منظور تنظیم توان راکتیو خروجی GSC، Q_g تغییر می کند (بر طبق شکل ۲). مقدار مرجع I_{gq} با استفاده از معادله ۱۴ قابل محاسبه می باشد. مقادیر مرجع Q_g و Q_s با حل مسئله بهینه سازی در بخش بعدی به دست می آیند.

ب) توزیع بهینه توان راکتیو

در مقایسه با استراتژی ب، این استراتژی تلفات توربین بادی را به مسئله بهینه سازی اضافه می کند. بنابراین، این استراتژی به حداقل رساندن مجموع تلفات توان راکتیو در مزرعه بادی را هدف خود قرار می دهد که شامل تلفات داخلی توربین های بادی و تلفات ترانسفورماتورها و کابلها می گردد. متغیرهای بهینه سازی عبارتند از مرجع توان راکتیو GSC، Q_g^{WTi} ، و مرجع توان راکتیو سمت استاتور، Q_s^{WTi} ، در هر توربین بادی. برای مسئله ی بهینه سازی داریم:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{NW} (P_{trans_i}^{loss} + P_{WT_i}^{loss}) + \sum_{k=1}^{NL} P_{Cable_k}^{loss} \quad (31)$$

$$P_j = |V_j| \sum_{i=1}^{NB} |V_i| |Y_{ji}| \cos(\theta_{ji} - \delta_j + \delta_i) \quad (30)$$

$$Q_j = -|V_j| \sum_{i=1}^{NB} |V_i| |Y_{ji}| \sin(\theta_{ji} - \delta_j + \delta_i) \quad (31)$$

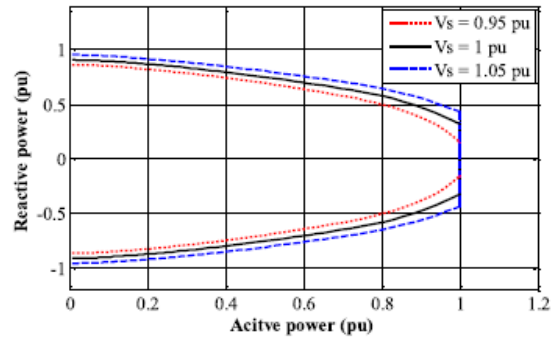
$$Q_{PCC} = Q_{ref}^{WP} \quad (32)$$

$$V_{min}^j \leq V_j \leq V_{max}^j \quad (33)$$

$$I_{GSC_4}^{rms} \leq I_{GSC}^{rated} \quad (34)$$

$$I_{RSC_1}^{rms} \leq I_{RSC}^{rated} \quad (35)$$

$$I_5^i \leq I_5^{rated} \quad (36)$$



شکل ۳. منحنی قابلیت DFIG بای ولتاژهای مختلف استاتور

ب) مدل قدیمی توزیع توان راکتیو در یک مزرعه بادی

الف) استراتژی الف: توزیع تناسبی: در این استراتژی، توان راکتیو مورد نیاز به صورت تناسبی و بر اساس توان راکتیو موجود در میان تمام ژنراتورهای عامل توزیع می گردد، در این حالت داریم:

$$Q_{ref}^{WTi} = \frac{Q_{avail}^{WTi}}{\sum_{i=1}^{NW} Q_{avail}^{WTi}} Q_{ref}^{Total} \quad (26)$$

که در آن Q_{ref}^{WTi} توان راکتیوی است که توربین بادی i باید تولید نماید، Q_{avail}^{WTi} توان راکتیو لحظه ای موجود برای توربین بادی i می باشد، N_W تعداد توربینهای بادی است و Q_{ref}^{Total} مجموع توان راکتیو مورد نیاز برای تمام توربین های بادی می باشد.

شایان ذکر است که Q_{ref}^{Total} مجموع توان راکتیو باید با مجموع توان راکتیو مورد نیاز مزارع بادی و تلفات توان راکتیو در کابلها برابر باشد.

$$Q_{ref}^{Total} = \sum_{k=1}^{NL} Q_{Cable_k}^{loss} + Q_{ref}^{WF} \quad (27)$$

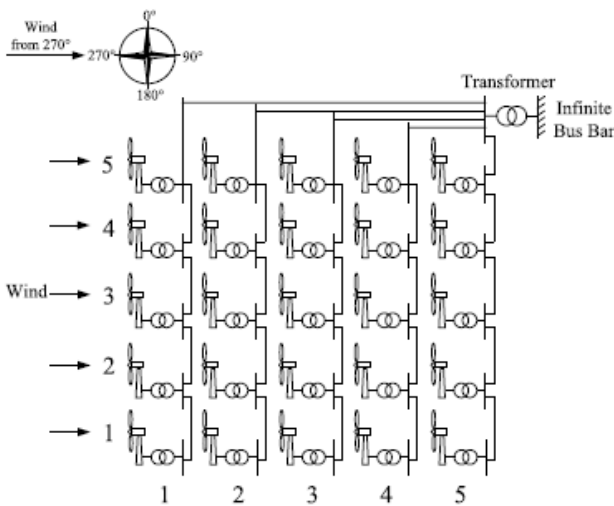
که در آن Q_{Cable}^{loss} برابر تلفات توان راکتیو در کابل k ، N_L تعداد کل کابلها و Q_{ref}^{WF} توان راکتیو مورد نیاز برای مزرعه بادی می باشند. این محدودیت توسط فرآیند تکرار اجرا می شود. فلوچارت پیاده سازی این استراتژی در شکل ۴ نشان داده شده است. با جستجوی منحنی قابلیت (شکل ۳) و با استفاده از ورودی های هر توربین بادی (V_s^{WTi} ولتاژ استاتور و P_{mec}^{WTi} توان مکانیکی) مقدار توان قابل دسترس برای هر توربین بادی تعیین می شود. مجموع توان راکتیو Q_{ref}^{Total} بعد از چند مرحله تکرار به دست می آید.

ب) استراتژی ب: حداقل تلفات انتقال مزرعه بادی: هدف این استراتژی توزیع به حداقل رساندن تلفات در مزرعه بادی می باشد که شامل تلفات توان راکتیو در مبدلها و کابلها می گردد. مرجع توان راکتیو توربین بادی Q_{ref}^{WTi} با حل مسئله ی بهینه سازی به دست می آید. تابع هدف این بهینه سازی را می توان به صورت زیر نمایش داد:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{NW} P_{trans_i}^{loss} + \sum_{k=1}^{NL} P_{Cable_k}^{loss} \quad (28)$$

که در آن $P_{trans_i}^{loss}$ تلفات توان راکتیو ترانسفورماتور i و $P_{Cable_k}^{loss}$ تلفات توان راکتیو در کابل k می باشند.

ولتاژ باس ها را محدود نموده و توان راکتیو حدهای هر WT را مشخص می کند.



شکل ۶. طرح یک مزرعه بادی

جدول ۱. پارامترهای کابلها

Cross section mm ²	Resistance Ω /km	Capacitance μF/km	Inductance mH/km
95	0.1842	0.18	0.44
150	0.1167	0.21	0.41
240	0.0729	0.24	0.38

الف) حالت اول: $V=10\text{m/s}$ ، جهت باد = 270° درجه

توزیع توان راکتیو به شدت به تقسیم توان اکتیو بستگی دارد. در این مقاله، توربین های بادی با استفاده از استراتژی قدیمی کنترل توان اکتیو کنترل می شدند که با منحنی توان قابل نمایش می باشد. مدل جنسن^۵ برای محاسبه ی اثر ویک موجود در توربین بادی بالای جریان استفاده می شود. سرعت باد در توربین های بادی پایین جریان با استفاده از روش پیشنهاد شده در مرجع ۳۱ محاسبه می گردد.

در این حالت، بار ورودی به مزرعه بادی داری سرعت ۱۰ متر بر ثانیه و جهت 270° درجه ای می باشد. بعد از محاسبه از طریق مدل ویک، سرعت باد بدست آمده در توربین های بادی هر ردیف در جدول ۲ آورده شده است. بر اساس سرعت باد و استراتژی قدیمی کنترل توان راکتیو توربین بادی، مجموع توان استخراج شده از باد در مزرعه ی بادی برابر با ۴۹.۸ مگاوات می باشد.

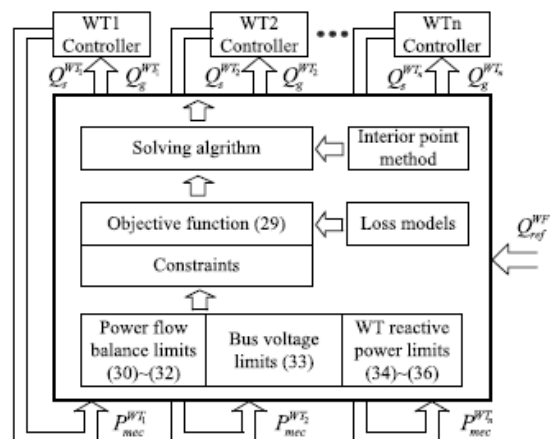
جدول ۲. سرعت باد در توربین های بادی در هر ردیف

Column	1	2	3	4	5
Wind velocity (m/s)	10	7.8	7.5	7.49	7.39

مجموع تلفات در استراتژی های گوناگون توزیع توان راکتیو در شکل ۷ نشان داده شده است. دامنه مقادیر مرجع توان راکتیو برای مزرعه بادی از -0.33 تا 0.33 می باشد (بر طبق کد شبکه بریتانیا). مشخص است که استراتژی پیشنهاد شده، استراتژی ج، می تواند مزرعه بادی را با حداقل تلفات کنترل نماید. استراتژی ب بیشترین مجموع تلفات را دارد، هرچند که هدف آن به حداقل رساندن تلفات کابلهای انتقالی و ترانسفورماتورها می باشد. مزیت استراتژی ج زمانی بیشتر به چشم می آید که مقدار قدرمطلق مرجع توان راکتیو برای مزرعه بادی، Q_{ref}^{WF} ، بزرگتر باشد.

که در آن P_{WTi}^{loss} تلفات توان اکتیو توربین بادی i ، P_j و Q_j توان اکتیو و راکتیو تزریق شده به باس j ، ولتاژ هر باس، Y_{ji} ورودی ردیف i ام وستون j ام ماتریس ادمیتانس، N_B تعداد کل باس ها، Q_{PCC} توان راکتیو در نقطه ی اتصال مشترک می باشند؛ همچنین I_{RSCi}^{rms} و I_{GSCi}^{rms} با استفاده از معادله ی ۱۲ قابل محاسبه می باشند.

قاعده کلی این استراتژی در شکل ۵ نمایش داده شده است. ورودی ها عبارتند از توان مکانیکی هر توربین بادی، P_{mec}^{WTi} برای توربین بادی i ، و مرجع توان راکتیو توربین بادی، Q_{ref}^{WF} . خروجی ها برای هر توربین بادی i برابرند با Q_s^{WTi} و Q_g^{WTi} تابع هدف (۲۹) می تواند از مدلهای بدست آمده ی تلفات در بخش ۲ تعیین گردد. محدودیت ها نیز عبارتند از حد تعادل شار توان (۳۰) - (۳۲)، حد ولتاژ باس (۳۳) و حد توان راکتیو (۳۶)-(۳۴). در این مقاله، دامنه ی ولتاژ بین $\{0.95-1.05\}$ در نظر گرفته می شود. مسئله بهینه سازی با استفاده از روش های نقطه داخلی حل می شود.



شکل ۵. فلوچارت استراتژی بهینه توزیع

همانطور که دیده می شود، هر توربین بادی باید دو مرجع از کنترل کننده مزرعه بادی دریافت نماید: Q_s^{WTi} و Q_g^{WTi} . این حالت کاملاً با طرح قدیمی کنترل توربین های بادی فرق دارد. دو متغیر کنترلی باید به طور جداگانه توسط GSC و RSC تنظیم شوند.

۴. مطالعه موردی

در این مقاله جهت آزمایش استراتژی پیشنهاد شده، یک مزرعه بادی با ۵ ردیف ۵ توربینی انتخاب می شود. مزرعه بادی طرح مستطیلی با فضای ۸۸۲ متر بین توربین ها دارد. شکل ۶ طرح مزرعه بادی را نشان می دهد. قطر کابلهای استفاده شده در مزرعه بادی ۹۵، ۱۵۰ یا ۲۴۰ میلی متر مربع (که با در نظر گرفتن بار، به ترتیب برای بین ردیف ۱ و ۳، ردیف ۳ و ۵ و ردیف ۵ با ترانسفورماتورها انتخاب شده اند)، جنس آنها XLPE-Cu و ولتاژ نامی شان 34kV می باشد. پارامترهای کابل ها در جدول ۱ ارائه شده اند. پارامترهای سیستم WT در ضمیمه آورده شده اند.

مجموع تلفات با جهت باد ۰ درجه همیشه کمترین مقدار را دارد در حالیکه در جهت ۲۷۰ درجه همیشه شاهد بیشترین مقدار می باشیم. این مورد را اینطور می توان توضیح داد که وقتی جهت باد ۰ درجه است، توربین های بادی با سرعت باد بیشتر به PCC نزدیکترند، بنابراین فاصله ی گردش توان راکتیو کمتر بوده و در نتیجه تلفات در کابلها کمتر خواهد بود.

جدول ۴. مجموع تلفات مزرعه بادی با استفاده از استراتژی های مختلف

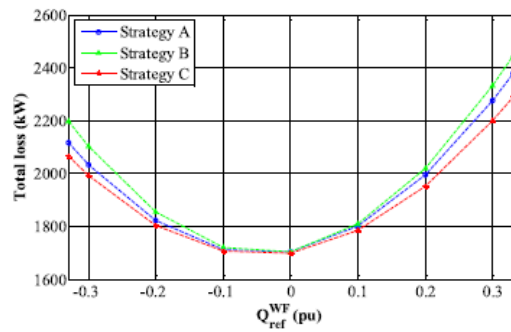
توزیع و جهت های گوناگون باد

WF Loss (kW)	Q_{ref}^{WF} (pu)	-0.33	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.1	0.2	0.3	0.33																																																																																																																										
		<table border="1"> <tr> <td rowspan="4">A</td> <td>0°</td> <td>2043</td> <td>1959</td> <td>1744</td> <td>1633</td> <td>1627</td> <td>1725</td> <td>1921</td> <td>2208</td> <td>2311</td> </tr> <tr> <td>90°</td> <td>2060</td> <td>1976</td> <td>1761</td> <td>1649</td> <td>1643</td> <td>1741</td> <td>1937</td> <td>2224</td> <td>2327</td> </tr> <tr> <td>180°</td> <td>2083</td> <td>2001</td> <td>1789</td> <td>1680</td> <td>1674</td> <td>1771</td> <td>1964</td> <td>2247</td> <td>2349</td> </tr> <tr> <td>270°</td> <td>2116</td> <td>2033</td> <td>1821</td> <td>1711</td> <td>1705</td> <td>1801</td> <td>1994</td> <td>2276</td> <td>2378</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">B</td> <td>0°</td> <td>2083</td> <td>1987</td> <td>1766</td> <td>1636</td> <td>1627</td> <td>1726</td> <td>1926</td> <td>2236</td> <td>2334</td> </tr> <tr> <td>90°</td> <td>2107</td> <td>2008</td> <td>1767</td> <td>1652</td> <td>1643</td> <td>1741</td> <td>1939</td> <td>2243</td> <td>2362</td> </tr> <tr> <td>180°</td> <td>2165</td> <td>2070</td> <td>1807</td> <td>1684</td> <td>1674</td> <td>1776</td> <td>1980</td> <td>2307</td> <td>2420</td> </tr> <tr> <td>270°</td> <td>2196</td> <td>2102</td> <td>1844</td> <td>1717</td> <td>1705</td> <td>1801</td> <td>2010</td> <td>2332</td> <td>2444</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">C</td> <td>0°</td> <td>1986</td> <td>1913</td> <td>1727</td> <td>1631</td> <td>1625</td> <td>1710</td> <td>1879</td> <td>2127</td> <td>2216</td> </tr> <tr> <td>90°</td> <td>2002</td> <td>1930</td> <td>1744</td> <td>1647</td> <td>1641</td> <td>1726</td> <td>1895</td> <td>2143</td> <td>2232</td> </tr> <tr> <td>180°</td> <td>2037</td> <td>1964</td> <td>1777</td> <td>1679</td> <td>1673</td> <td>1757</td> <td>1927</td> <td>2176</td> <td>2264</td> </tr> <tr> <td>270°</td> <td>2070</td> <td>1997</td> <td>1808</td> <td>1710</td> <td>1703</td> <td>1787</td> <td>1956</td> <td>2208</td> <td>2293</td> </tr> </table>										A	0°	2043	1959	1744	1633	1627	1725	1921	2208	2311	90°	2060	1976	1761	1649	1643	1741	1937	2224	2327	180°	2083	2001	1789	1680	1674	1771	1964	2247	2349	270°	2116	2033	1821	1711	1705	1801	1994	2276	2378	B	0°	2083	1987	1766	1636	1627	1726	1926	2236	2334	90°	2107	2008	1767	1652	1643	1741	1939	2243	2362	180°	2165	2070	1807	1684	1674	1776	1980	2307	2420	270°	2196	2102	1844	1717	1705	1801	2010	2332	2444	C	0°	1986	1913	1727	1631	1625	1710	1879	2127	2216	90°	2002	1930	1744	1647	1641	1726	1895	2143	2232	180°	2037	1964	1777	1679	1673	1757	1927	2176	2264	270°	2070	1997	1808	1710	1703	1787	1956
A	0°	2043	1959	1744	1633	1627	1725	1921	2208	2311																																																																																																																										
	90°	2060	1976	1761	1649	1643	1741	1937	2224	2327																																																																																																																										
	180°	2083	2001	1789	1680	1674	1771	1964	2247	2349																																																																																																																										
	270°	2116	2033	1821	1711	1705	1801	1994	2276	2378																																																																																																																										
B	0°	2083	1987	1766	1636	1627	1726	1926	2236	2334																																																																																																																										
	90°	2107	2008	1767	1652	1643	1741	1939	2243	2362																																																																																																																										
	180°	2165	2070	1807	1684	1674	1776	1980	2307	2420																																																																																																																										
	270°	2196	2102	1844	1717	1705	1801	2010	2332	2444																																																																																																																										
C	0°	1986	1913	1727	1631	1625	1710	1879	2127	2216																																																																																																																										
	90°	2002	1930	1744	1647	1641	1726	1895	2143	2232																																																																																																																										
	180°	2037	1964	1777	1679	1673	1757	1927	2176	2264																																																																																																																										
	270°	2070	1997	1808	1710	1703	1787	1956	2208	2293																																																																																																																										

(ج) حالت سوم: $Q_{ref}^{WF} = 0.3$ pu, $V = 10$ m/s

ویک در جهت های ۰، ۹۰ و ۱۸۰ الگوی یکسانی دارد زیرا مزرعه بادی مربع است و فاصله بین توربین های بادی نیز یکسان می باشد. بنابراین، اثر استراتژی پیشنهاد شده باید برای دیگر جهت ها ارزیابی شود. در این حالت، دامنه ی جهت های باد از ۱۸۰ تا ۲۷۰ درجه با افزایش پله ای ۱۰ درجه در نظر گرفته شده است. سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه و Q_{ref}^{WF} برابر با 0.3pu است. در طول سال معمولاً جهت وزش باد در همین محدوده قرار می گیرد. مجموع توان مزرعه بادی در هر جهت باد در شکل ۸ نشان داده شده است.

مقایسه یاستراتژی ها در شکل ۹ نمایش داده شده است. علامت اختصاری A-C به معنای کاهش تلفات در استراتژی ج نسبت به الف می باشد. برای علامت اختصاری B-C نیز معنای مشابهی داریم. می توان مشاهده نمود که مجموع تلفات با استفاده از استراتژی ج همیشه کمترین مقدار و با استراتژی ب بیشترین مقدار را دارد. مجموع تلفات در جهت های ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه در مقایسه با دیگر جهت ها کمتر میباشد. این بدین علت است که اثر ویک در جهت های ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه قوی تر بوده و در نتیجه توان باد در توربین های پایین جریان کمتر بوده و منجر به کاهش تلفات در مزرعه بادی می گردد. با این وجود، کاهش تلفات در جهات ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه نسبت به جهت های دیگر بیشتر است. این نتیجه ی اثر ویک است. توان اکتیو در هر توربین بادی موجود در مزرعه بادی با تغییر جهت باد بسیار تغییر می کند. همانطور که در بخش ۲ نشان داده شده، تلفات توربین بادی نسبتی از مربع جریان موجود در آن است، در نتیجه با تغییر جریان شاهد تغییرات بیشتری در تلفات هستیم. این امر فضای بیشتری برای کاهش مجموع تلفات در توزیع بهینه توان راکتیو به ما می دهد.



شکل ۷. مجموع تلفات مزرعه بادی با استفاده از استراتژی های گوناگون توزیع

به منظور دستیابی به دلیل اصلی مزایای استراتژی ج، تلفات هر مؤلفه در مزرعه بادی را با استفاده از استراتژی های الف، ب و ج محاسبه نمودیم که در جدول ۳ شاهد نتایج آن می باشید. واضح است که با استفاده از استراتژی ب، تلفات کابلها و ترانسفورماتورها کمترین مقدار را دارد، اما تلفات توربین های بادی بیشترین مقدار را دارند و این بدان معناست که با به حداقل رساندن تلفات کابلها، تلفات توربین های بادی و ترانسفورماتورها افزایش می یابد. تلفات کابلها و ترانسفورماتورها در استراتژی ج بیشتر از استراتژی ب هستند. با این حال، تلفات توربین های بادی با استفاده از استراتژی ج به طور چشمگیری کاهش می یابد و همین امر موجب حواقل مجموع تلفات در این استراتژی می گردد. تلفات کابلها و ترانسفورماتورها در استراتژی الف همیشه بیشترین مقدار را به خود اختصاص می دهند در حالیکه تلفات توربین های بادی در این حالت خیلی کمتر از حالت ب می باشد. بنابراین مجموع تلفات در استراتژی الف همچنان از ب کمتر است.

همینطور می توان مشاهده نمود که وقتی Q_{ref}^{WF} مثبت است، نسبت به حالت منفی تلفات بالاتری داریم، حتی با وجود برابر بودن مقدار قدرمطلق Q_{ref}^{WF} . علت این امر این است که وقتی توربین بادی مقداری توان راکتیو برای تحریک شدن جذب می کند، تلفات در آن به حداقل می رسند (به مرجع ۳۲ مراجعه شود). بنابراین وقتی Q_{ref}^{WF} منفیست، مجموع تلفات توربین های بادی نسبتاً کم است.

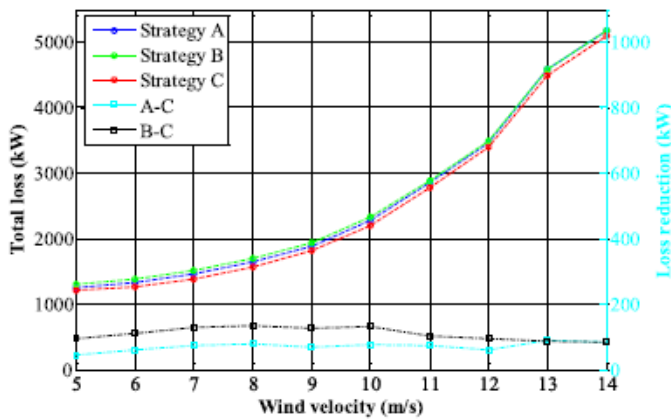
جدول ۳. تلفات در مؤلفه های مختلف مزرعه بادی با استفاده از

استراتژی های گوناگون توزیع

WF Losses (kW)	Q_{ref}^{WF} (pu)	-0.33	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.1	0.2	0.3	0.33																																																																																												
		<table border="1"> <tr> <td rowspan="3">A</td> <td>Cable+Transformers</td> <td>718</td> <td>695</td> <td>634</td> <td>597</td> <td>584</td> <td>594</td> <td>628</td> <td>686</td> <td>707</td> </tr> <tr> <td>Turbine</td> <td>1398</td> <td>1339</td> <td>1188</td> <td>1114</td> <td>1121</td> <td>1207</td> <td>1365</td> <td>1591</td> <td>1671</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>2116</td> <td>2033</td> <td>1821</td> <td>1711</td> <td>1705</td> <td>1801</td> <td>1994</td> <td>2276</td> <td>2378</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">B</td> <td>Cable+Transformers</td> <td>702</td> <td>682</td> <td>628</td> <td>595</td> <td>584</td> <td>593</td> <td>623</td> <td>674</td> <td>694</td> </tr> <tr> <td>Turbine</td> <td>1495</td> <td>1421</td> <td>1228</td> <td>1125</td> <td>1121</td> <td>1215</td> <td>1397</td> <td>1658</td> <td>1750</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>2197</td> <td>2103</td> <td>1856</td> <td>1720</td> <td>1705</td> <td>1808</td> <td>2020</td> <td>2332</td> <td>2444</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">C</td> <td>Cable+Transformers</td> <td>712</td> <td>690</td> <td>629</td> <td>593</td> <td>580</td> <td>591</td> <td>624</td> <td>681</td> <td>702</td> </tr> <tr> <td>Turbine</td> <td>1354</td> <td>1303</td> <td>1175</td> <td>1113</td> <td>1119</td> <td>1193</td> <td>1328</td> <td>1520</td> <td>1588</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>2066</td> <td>1993</td> <td>1805</td> <td>1706</td> <td>1700</td> <td>1783</td> <td>1953</td> <td>2201</td> <td>2289</td> </tr> </table>										A	Cable+Transformers	718	695	634	597	584	594	628	686	707	Turbine	1398	1339	1188	1114	1121	1207	1365	1591	1671	Total	2116	2033	1821	1711	1705	1801	1994	2276	2378	B	Cable+Transformers	702	682	628	595	584	593	623	674	694	Turbine	1495	1421	1228	1125	1121	1215	1397	1658	1750	Total	2197	2103	1856	1720	1705	1808	2020	2332	2444	C	Cable+Transformers	712	690	629	593	580	591	624	681	702	Turbine	1354	1303	1175	1113	1119	1193	1328	1520	1588	Total	2066	1993	1805	1706	1700	1783	1953
A	Cable+Transformers	718	695	634	597	584	594	628	686	707																																																																																												
	Turbine	1398	1339	1188	1114	1121	1207	1365	1591	1671																																																																																												
	Total	2116	2033	1821	1711	1705	1801	1994	2276	2378																																																																																												
B	Cable+Transformers	702	682	628	595	584	593	623	674	694																																																																																												
	Turbine	1495	1421	1228	1125	1121	1215	1397	1658	1750																																																																																												
	Total	2197	2103	1856	1720	1705	1808	2020	2332	2444																																																																																												
C	Cable+Transformers	712	690	629	593	580	591	624	681	702																																																																																												
	Turbine	1354	1303	1175	1113	1119	1193	1328	1520	1588																																																																																												
	Total	2066	1993	1805	1706	1700	1783	1953	2201	2289																																																																																												

(ب) حالت دوم: $V = 10$ m/s، جهت باد = ۰، ۹۰ و ۱۸۰ درجه

جدول ۴ مجموع تلفات در مزرعه بادی با استفاده از استراتژی های مختلف توزیع و جهت باد ۰، ۹۰ و ۱۸۰ درجه را نشان می دهد. از آنجاکه مزرعه بادی مستطیل مربعیست، در هر مورد مجموع توان استخراج شده از مزرعه بادی باید برابر باشد (۴۹.۸ مگاوات). در تمامی نقاط تنظیم شده برای جهت باد و توان راکتیو مزرعه بادی، مجموع تلفات در استراتژی ج کمترین مقدار و در استراتژی ب بیشترین مقدار را دارد.

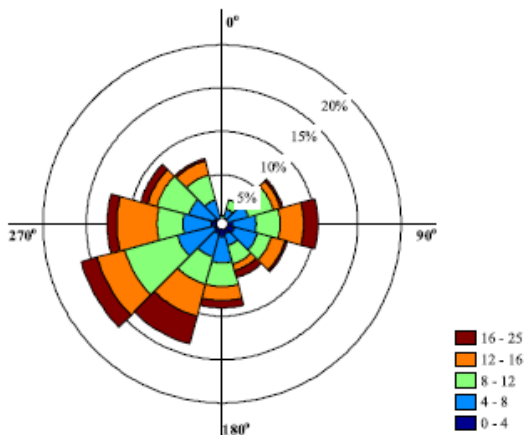


شکل ۱۰. مجموع تلفات با استفاده از سه استراتژی و کاهش تلفات با توجه به استراتژی ج در سرعت های مختلف باد

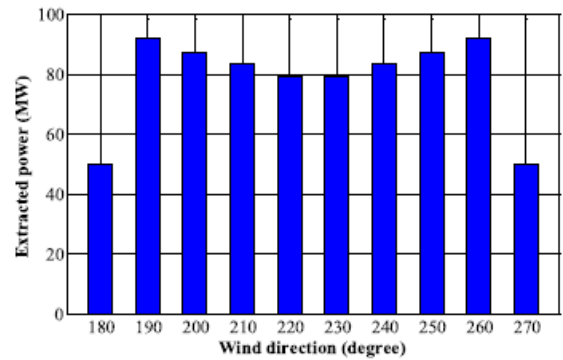
ه) حالت پنجم: مجموع تلفات مزرعه بادی در یک سال

از آنجاییکه مجموع تلفات با سرعت و جهت باد تغییر می کند، لازم است تا اثربخشی استراتژی پیشنهاد شده را در طول یک سال ارزیابی نماییم. داده های باد برگرفته از مؤسسه ی هواشناسی نروژ^۶ می باشند. سرعت های باد هر ۳ ساعت نمونه گیری شده و در در یک روز از آنها میانگین گرفته شده است. همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده، داده های باد با خیزش باد در یک فاصله ی ۳۰ درجه ای قابل نمایش هستند.

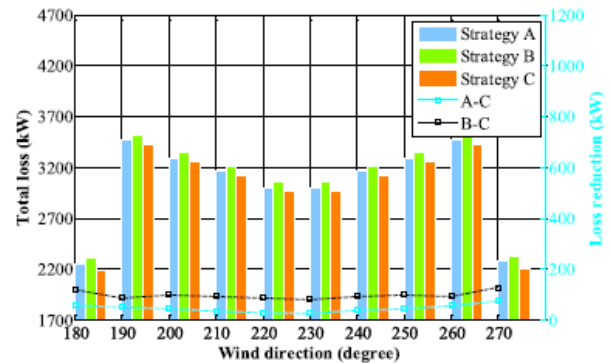
با فرض اینکه در طول یک سال تمام توربین های بادی را در اختیار داریم، مجموع توان استخراج شده از باد در توربین های بادی و مجموع تلفات با استفاده از استراتژی های بیان شده و داده های باد، به طور جداگانه محاسبه شده اند. نتایج در جدول ۶ ارائه شده اند. کجکوه توان بدست آمده از باد برابر ۶۱۸.۵۱ GWh است و مجموع تلفات در یک سال و با Q_{ref}^{WF} مختلف در جدول ۵ ارائه شده است. در مقایسه با دو استراتژی الف و ب، استراتژی ج در هر مقدار تنظیم شده Q_{ref}^{WF} مقدار زیادی از توان باد را ذخیره می کند. بیشترین میزان ذخیره سازی استراتژی ب برابر ۰.۹۸ GWh است در حالتیکه در کل سال $Q_{ref}^{WF}=0.33$ pu باشد.



شکل ۱۱. برخواستن باد در ناحیه ی بادخیز در مجاورت FINO3.



شکل ۸. مجموع توان استخراج شده از مزرعه بادی در هر جهت باد.



شکل ۹. مجموع تلفات بر اساس سه استراتژی و کاهش تلفات با استفاده

از استراتژی ج در جهت های مختلف باد

د) حالت چهارم: جهت باد = 270° درجه، $Q_{ref}^{WF} = 0.3$ pu.

در این حالت، این استراتژی ها در سرعت های مختلف باد ارزیابی می شوند. سرعت باد از ۵ تا ۱۴ متر بر ثانیه تغییر می کند. دلیلی انتخاب این بازه این است که وقتی سرعت باد کمتر از ۵ متر بر ثانیه باشد، سرعت باد در برخی از توربین های پایین جریان باد کمتر از سرعت برش باد خواهد بود، در حالیکه وقتی سرعت باد بیشتر از ۱۴ m/s باشد، در تمامی توربین های بادی، از سرعت نامی بالاتر می رویم. مجموع توان استخراج شده از مزرعه بادی در هر سرعت باد در جدول ۵ نشان داده شده است. مجموع تلفات و کاهش تلفات در شکل ۱۰ به نمایش درآمده است. مجموع تلفات با استفاده از استراتژی ج همیشه کمترین و با استراتژی ب همیشه بیشترین مقدار خود را دارد. کاهش تلفات با سرعت باد تغییر می کند. بیشترین کاهش تلفات را زمانی داریم که سرعت باد برابر ۸ متر بر ثانیه است. این هم بدین علت است که در این سرعت، تغییر سرعت باد در بین توربین های بادی قوی تر می باشد.

جدول ۵. مجموع توان استخراج شده از مزرعه بادی در هر سرعت باد

Wind speed (m/s)	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Extracted Power (MW)	3	7	15	24	36	50	67	88	115	125

جدول ۸. پارامترهای 5MW DFIG

Parameters	Value	Per unit value
Rated Mechanical Power	5MW	1.0 pu
Rated Stator Phase Voltage	548.48 V (rms)	1.0 pu
Rated Stator Frequency	50 Hz	1.0 pu
Rated Rotor Speed	1170 rpm	1.0 pu
Nominal Rotor Speed Range	670-1170 rpm	0.573-1.0 pu
Rated Slip	-0.17	
Number of Pole Pairs	3	
Stator Winding Resistance, R_s	1.552 mΩ	0.0086 pu
Rotor Winding Resistance, R_r	1.446 mΩ	0.008 pu
Stator Leakage Resistance, L_{ls}	1.2721 mH	2.2141 pu
Rotor Leakage Resistance, L_{lr}	1.1194 mH	1.9483 pu
Magnetizing Inductance, L_m	5.5182 mH	9.6044 pu
Base Current, I_B	3038.7 A (rms)	1.0 pu
Base Impedance, Z_B	0.1805 Ω	1.0 pu

مراجع

[1] Qin B, Li H, Zhou X, Li J, Liu W. Low-voltage ride-through techniques in DFIG-based wind turbines: a review. *Applied Sciences*. 2020 Mar 22;10(6):2154.

[۲] دانیالی، شیرخانی، دادوند، شکرپیگی، امیرمحمد. ارائه و بررسی یک مبدل DC-DC افزاینده با ورودی از سیستم خورشیدی. روش های محاسباتی در علوم مهندسی. Aug 19 ۲۰۲۳.

[3] Aazami R, Dabestani S, Shirkhani M. Optimal capacity and location for renewable-based microgrids considering economic planning in distribution networks. *International Journal of Engineering*. 2023 Dec 1;36(12):2175-83.

[4] Sahri Y, Tamalouzt S, Belaid SL, Bajaj M, Belkhier Y, Singh AR, El-Naggar MF, Kamel S. Effectiveness analysis of twelve sectors of DTC based on a newly modified switching table implemented on a wind turbine DFIG system under variable wind velocity. *Ain Shams Engineering Journal*. 2023 Nov 1;14(11):102221.

[5] Danyali S, Shirkhani M, Tavooosi J, Razi AG, Salah MM, Shaker A. Developing an integrated soft-switching bidirectional DC/DC converter for solar-powered LED street lighting. *Sustainability*. 2023 Oct 18;15(20):15022.

[۶] عزیزی، پاریاب، عرفان. Comparing the performance of SVC and STATCOM for reactive power compensation in transmission lines. روش های محاسباتی در علوم مهندسی. Nov 22;1(3):12-21. ۲۰۲۳.

[7] Danyali S, Shirkhani M, Yousefi S, Tavooosi J, Moteiri L, Salah M, Shaker A. Design PV-fed LED streetlight using Soft-Switching bidirectional DC-DC converter with optimal flux control. *Ain Shams Engineering Journal*. 2024 May 17:102844.

[8] Tavooosi J, Yousefi S. A New Nonlinear Recurrent Type-2 Fuzzy Model to Identify the Behavior of Nonlinear Dynamic Systems. *Signal and Data Processing*. 2023 Jun 10;20(1):171-80.

[9] Gupta S, Shukla A. Improved dynamic modelling of DFIG driven wind turbine with algorithm for optimal sharing of reactive power between converters. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022 Jun 1;51:101961.

[10] Tamalouzt S, Belkhier Y, Sahri Y, Bajaj M, Ullah N, Chowdhury MS, Titseesang T, Techato K. Enhanced direct reactive power control-based multi-level inverter for DFIG wind system under variable speeds. *Sustainability*. 2021 Aug 13;13(16):9060.

[11] Radaideh A, Bodoor MM, Al-Quraan A. Active and reactive power control for wind turbines based DFIG using LQR controller with optimal Gain-scheduling. *Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2021;2021(1):1218236.

[12] Qi J, Zhao W, Bian X. Comparative study of SVC and STATCOM reactive power compensation for prosumer microgrids with DFIG-based wind farm integration. *IEEE Access*. 2020 Oct 22;8:209878-85.

[۱۳] عزیزی، پاریاب، عرفان. Comparing the performance of SVC and STATCOM for reactive power compensation in transmission lines. روش های محاسباتی در علوم مهندسی. Nov 22;1(3):12-21. ۲۰۲۳.

جدول ۶. مجموع تلفات در مزرعه بادی در طول یک سال با استفاده از

استراتژی های مختلف توزیع WF

Q_{ref}^{WF} Loss (pu) (GWh)	-0.33	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.1	0.2	0.3	0.33
A	26.10	25.42	23.65	22.71	22.65	23.43	24.98	27.25	28.07
B	26.47	25.75	23.79	22.75	22.65	23.45	25.08	27.51	28.35
C	25.70	25.10	23.53	22.69	22.63	23.32	24.68	26.67	27.38
A-C	0.41	0.32	0.12	0.01	0.02	0.11	0.30	0.58	0.69
B-C	0.77	0.65	0.26	0.06	0.02	0.13	0.40	0.83	0.98

۵. نتیجه گیری

در این مقاله یک استراتژی بهینه توزیع توان راکتور برای به حداقل رساندن مجموع تلفات هر جزء از مزرعه بادی از جمله ژنراتورها، مبدلها، فیلترها، ترانسفورماتورها و کابلها، ارائه می شود. مسئله ی بهینه سازی محدودیت های برابری تعادل توان، محدودیت های ولتاژی و زاویه ای در باس ها و حد توان راکتور توربین های بادی را لحاظ می کند. دو استراتژی قدیمی با استراتژی پیشنهاد شده مقایسه می شوند و نتایج حاکی از اثربخشی بیشتر استراتژی پیشنهاد شده می باشند. این استراتژی می تواند در سیستم های مدیریت انرژی مزرعه بادی یا مراکز توزیع توان بادی مورد استفاده قرار گیرد. پیاده سازی این استراتژی بهینه به اصلاح در سطح کنترل WT نیاز دارد، یعنی هر توربین بادی باید بتواند دو مرجع توان قابل کنترل توسط RSC و GSC را دنبال کند. توسعه بیشتر این استراتژی توزیع می تواند استراتژی توزیع بهینه توان اکتیو را به همراه داشته باشد تا خروجی مجموع توان اکتیو نیز به حداکثر برسد.

ضمیمه

الف) توربین بادی

WT NERL 5 MW به عنوان مرجع توربین بادی پذیرفته می شود. پارامترهای آن در جدول ۷ نشان داده شده اند.

جدول ۷. مشخصات توربین بادی NERL 5 MW

Parameter	5 MW NERL Wind Turbine
Cut-in, Rated, Cut-out Wind Speed	3 m/s, 11.4 m/s, 25m/s
Rotor, Hub Diameter	126 m, 3m
Rated Power	5 MW
Cut-In, Rated Rotor Speed	6.9 rpm, 12.1 rpm
Gearbox ratio	97:1

ب) مبدلها

ماژول IGBT مدل ABB 5SNA 2000K451300 برای این کار انتخاب شده است. برای اساس داده های ماژول IGBT موجود در برگه اطلاعات، ثابت های ماژول توان عبارتند از $a_1=7.0252$ و $b_1=0.0087$ و f_{sw} برابر با ۸۰۰ هرتز انتخاب می گردد.

ج) ترانسفورماتور

ترانسفورماتور مدل Siemens GEAFOL cast-resin به عنوان ترانسفورماتور توربین بادی انتخاب شده است. ترانسفورماتور ۸۰۰kVA می باشد با تلفات بی باری ۱۳.۵kW و تلفات زیر بار ۳۶kW.

د) DFIG

پارامترهای DFIG در جدول ۸ آورده شده اند.

- [14] Ghosh S, Isbeih YJ, Bhattarai R, El Moursi MS, El-Saadany EF, Kamalasadani S. A dynamic coordination control architecture for reactive power capability enhancement of the DFIG-based wind power generation. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2020 Jan 22;35(4):3051-64.
- [15] Venkateswaran R, Joo YH. Stabilization of DFIG-based wind turbine with active and reactive power: A coupling memory state-feedback control scheme. *Information Sciences*. 2023 Nov 1;648:119468.
- [16] Eltamaly AM, Al-Saud M, Sayed K, Abo-Khalil AG. Sensorless active and reactive control for DFIG wind turbines using opposition-based learning technique. *Sustainability*. 2020 Apr 28;12(9):3583.
- [17] Karaagac U, Kocar I, Mahseredjian J, Cai L, Javid Z. STATCOM integration into a DFIG-based wind park for reactive power compensation and its impact on wind park high voltage ride-through capability. *Electric Power Systems Research*. 2021 Oct 1;199:107368.
- [18] Sun L, Zhao X. Impacts of phase-locked loop and reactive power control on inertia provision by DFIG wind turbine. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2021 Jul 29;37(1):109-19.
- [19] Huang S, Li P, Wu Q, Li F, Rong F. ADMM-based distributed optimal reactive power control for loss minimization of DFIG-based wind farms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020 Jun 1;118:105827.
- [20] Atallah M, Mezouar A, Fernández-Ramírez LM, Belgacem K, Saidi Y, Benmahdjoub MA, Brahmi B. Supervisory control of reactive power in wind farms with doubly fed induction generator-based wind turbines for voltage regulation and power losses reduction. *Electric Power Systems Research*. 2024 Mar 1;228:110059.
- [21] Abdulabbas AK, Alawan MA, Shary DK. Limits of reactive power compensation of a doubly fed induction generator based wind turbine system. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2023 Oct 1;12(5):2521-34.
- [22] Tavoosi J, Mohammadzadeh A, Pahlevanzadeh B, Kasmani MB, Band SS, Safdar R, Mosavi AH. A machine learning approach for active/reactive power control of grid-connected doubly-fed induction generators. *Ain Shams Engineering Journal*. 2022 Mar 1;13(2):101564.
- [23] Chawda GS, Shaik AG. A reactive power-based adaptive approach for synchronization of DFIG into the weak grid to support existing WE infrastructure. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2024 Jun 1;157:109850.
- [24] Tang W, Hu J, Zhang R, Chen X, Yang Z. Coupling characteristics of DFIG-based WT considering reactive power control and its impact on phase/amplitude transient stability in a rotor speed control timescale. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2021 Jun 25;8(2):511-22.
- [25] Guediri A, Touil S. Modeling and comparison of fuzzy-PI and genetic control algorithms for active and reactive power flow between the stator (DFIG) and the grid. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2022 Jun 6;12(3):8640-5.