

## استراتژی کنترل هماهنگ توان راکتیو برای انتقال قدرت بادی در مقیاس بزرگ

### توسط لینک های LCC-HVDC

#### چکیده

وقفه و نوسان خروجی‌های فارم‌های بادی مقیاس بزرگ منجر به مشکلات چشمگیری در سیستم‌های انتقال قدرت توسط لینک‌های (LCC-HVDC) جریان مستقیم ولتاژ بالای مبدل کموتاسیون خطی می‌شود. دستگاه‌های قدیمی جبران‌سازی توان راکتیو همچون فیلترهای AC قادر به تنظیم مستمر توازن توان راکتیو نیستند. این مقاله استراتژی هماهنگی از کنترل توان راکتیو را ارائه می‌کند تا تنظیمات مستمر و مداوم را اتخاذ کند. یک کندانسور هماهنگ (SC) در ایستگاه مبدل DC به منظور همکاری با فیلترهای AC به کار می‌رود. ظرفیت SC با ظرفیت کمینه و منطقه مرده از واحد فیلتر AC مشخص می‌شود و مقرون به صرفه بودن نیز لحاظ می‌شود. در حالی که خروجی‌های قدرت تقاضای توان راکتیو فراتر از ظرفیت SC است، یک واحد فیلتر AC عمل می‌کند و SC نیز تنظیمات را اعمال می‌کند تا توازن توان راکتیو را حفظ کند. استراتژی کنترل ارائه شده با شبیه‌سازی PSCAD/EMTDC اعتبارسنجی می‌شود.

#### 1. مقدمه

مسائل محیطی ناشی از جبران‌سازی مصرف سوخت فسیلی موجب توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر شده است. در ۳۰ سال اخیر، قدرت بادی سریعاً توسعه یافته است و از نقطه نظر کامل شده است. به تازگی، اساساً دو نوع قدرت بادی وجود دارد، که زنراتور سنکرون مغناطیس دائم (PMSG) و زنراتور القایی دابل تغذیه وجود دارد [۱]. ظرفیت راه-

اندازی شده مزارع بادی در چین اخیرا بزرگترین مزارع در جهان می‌باشد. با توجه به اجرای جهانی انرژی، دهها مزارع بادی سطح MW در مناطق شمال غربی ایجاد شده است. منبع انرژی بادی در این مناطق بسیار متمرکز است و انتقال بالا اجتناب ناپذیر است. لینک‌های HVDC به دلیل انتقال مسافت بالا بسیار مناسب‌تر از سیستم‌های جریان جاییگزين ولتاژ بالا است [۲].

سیستم (LCC-HVDC) جریان مستقیم ولتاژ بالای مبدل خط تبدیلی برای انتقال قدرت در منطقه شمال غربی ایده‌آل است، که شبکه قدرت آن دارای ضعیف، مدولاسیون فرکانس ضعیف و قابلیت اصلاح کردن ضعیف است. در کل، اظهار و توافق بر این است که LCCها نسبت به سایر HVDCها از منظر قابلیت اعتماد، هزینه و کارایی برتر است. LCC-HVDC می‌تواند سریعاً توان اکتیو را تنظیم کند تا نوسانات خروجی مزارع بادی را انطباق دهد و واریانس قدرت را برای مرکز بار در مناطق مرکزی و شرقی انتقال دهد. با این وجود، LCC-HVDC برخی از محدودیت‌ها را دارد. دستگاه‌های جبران‌سازی توان راکتیو (RPCDها) در سیستم‌های LCC-HVDC obligatory است و با ظرفیت فزاینده سیستم، توازن توان راکتیو در ایستگاه‌های مبدل بسیار و بسیار پیچیده می‌شود [۳]. در عین حال، intermittence و واریانس سریع خروجی‌های باد موجب افزایش سختی کنترل توان راکتیو (RPC) در سیستم LCCHVDC می‌شود. در نتیجه، این بسیار روشن است که مسئله RPC برای مزارع بادی مقیاس بزرگ توسط لینک‌های LCC-HVDC حل شود.

منابع چندین راهبرد RPC را در سیستم‌های LCC-HVDC ارائه می‌کند که از منظر سه جنبه دسته‌بندی می‌شود یعنی: بهینه‌سازی مصرف توان راکتیو از مبدل LCC-HVDC [۴،۵]، بهبود توپولوژی RPCDها [۶] و افزایش ثبات مبدل‌های HVDC در سیستم‌های ضعیف AC یا بسیار مخصوص در سیستم‌های مزارع بادی می‌شود [۷-۱۰].

دای و همکاران [۴] یک تابع RPC از LCC اجرا شده در یک سیستم مدیریت انرژی را ارائه می‌کند، تا مصرف خالص توان راکتیو سیستم HVDC را با کنترل همکارانه دستگاه‌های متنوع توان راکتیو کمینه‌سازی کند از جمله فیلترهای AC، ظرفیت‌های شنت، راکتورهای شنت، SCها، و جبران‌ساز var استاتیک (SVCها). زوو و زانگ [۵]

یک RPC در جانب مبدل از سیستم LCC-HVDC را با ظرفیت‌های قابل کنترل ارائه می‌کنند. قابلیت فعالیت تحت زاویه انقراض منفی استفاده می‌شود بدین منظور که طیف وسیعی از RPC و قابلیت استخراج توان راکتیو را بدست آورد.

همچنین، یک طرح عملیاتی از LCC-HVDC به منظور بیشینه‌سازی اندازه خازن شنت در سیستم AC در [۶] ارائه می‌شود به طوری که تعداد خازن شنت به حداقل می‌رسد.

یک راهبرد و استراتژی تعادل توان راکتیو در مقاله [۷] ارائه می‌شود تا ثبات مبدل HVDC متصل به شبکه‌های ضعیف را افزایش دهد. یک ترانسفورماتور مبدل جدید و شاخه‌های تماما تنظیم شده شامل زیر سیستم‌های مبدل برای پیاده‌سازی یک روش فیلترینگ القایی است. با توسعه سریع دستگاه‌های الکترونیک قدرت، RPCD‌های الکترونیک قدرت ادغام می‌شود تا RPC سریع را منتشر کند. المهدی و همکاران [۸] تعیین جبران‌سازی راکتیو دینامیک از یک سیستم LCC-HVDC متصل به یک سیستم AC در باس یکسوساز را بحث می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد که کندانسور سنکرون (SC) عملکرد دینامیکی بهتری را در مقایسه با خازن فیکس شده ارائه می‌کند. بطور خاص، منابع نیز تحقیقاتی را در استراتژی کنترل هماهنگ بین مزارع بادی و مبدل‌های HVDC ایجاد می‌کند. یک استراتژی RPC هماهنگ بین مزارع بادی و مبدل‌های HVDC برای حل نوسان ولتاژ AC در [۹، ۱۰] ارائه می‌شود که یک استراتژی کنترل هماهنگ و طرح پیکربندی از RPCD از سیستم DC برای انتقال قدرت بادی حرارتی دسته‌بندی را ارائه می‌کند تا RPCD مرسوم با SVC را جایگزین می‌کند تا دفعات اقدام از RPCD مرسوم را حل کند.

با اینحال، چندین مطالعه بر روی استراتژی RPC هماهنگ در مبدل‌های HVDC انجام می‌شود که در عین حال خروجی‌های قدرت مزارع بادی را مکرراً دچار نوسان می‌کند. RPCD‌های الکترونیک قدرت همچون SVC و SVG می‌تواند کنترل قدرت هماهنگ سریع را منتشر کند، و اما برای برآورده نمودن الزامات منبع تغذیه توان راکتیو گذار سخت است.

در این مقاله، یک استراتژی RPC هماهنگ ارائه میشود. نخست، یک طرح پیکربندی از PRCD های دینامیکی در مبدل های DC ارائه میگردد. یک SC به منظور همکاری با فیلترهای AC به کار میرود. ظرفیت و گروه بندی فیلترهای AC با مهندسی دیسیپلین و نظم و انضباط مشخص می شود. تعیین منطقه مرده از سوئیچینگ فیلترهای AC اجتناب از سوئیچینگ مکرر دستگاه را در نظر می گیرد، و ظرفیت SC از این منطقه مرده محاسبه می شود و صرفه جوئی در هزینه بهینه سازی می شود. سپس، یک روش کنترل هماهنگ بر اساس فیلترهای AC و SC ارائه می شود. در حالی که خروجیهای قدرت مزارع بادی دچار نوسان میشود، مقدار تنظیمی توان اکتیو DC تغییر میکند و همچنین تقاضای توان راکتیو نیز تغییر می یابد. SC به سرعت واکنش نشان می دهد تا توان راکتیو را به موازنه برساند. زمانی که تقاضای توان راکتیو فراتر از ظرفیت SC باشد، یک واحد فیلتر AC فعالیت میکند و SC تنظیم مجدد را انجام می دهد تا تعادل توان راکتیو را حفظ کند. نتایج شبیه سازی نشان میدهد که استراتژی کنترل ارائه شده بتواند جبران سازی توان راکتیو موثر را بدست آورد، در عین حالی که تنظیم سریع و مستمر را تحقق میبخشد.

## 2. مدل سیستم

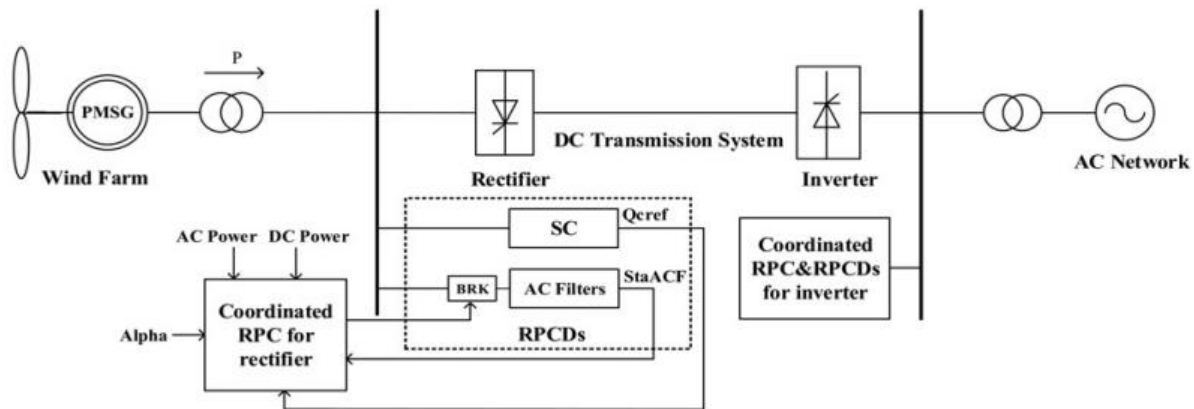
سیستم مطالعه شده در شکل 1 نشان داده شده است. سیستم مزرعه بادی PMSG را بعنوان منبع انرژی به کار می رود، در حالی که LCC-HVDC برای انتقال توان مسافت طولانی از منبع به مرکز بار استفاده می شود. فیلترهای AC در هر دو مبدل DC برای فیلتراسیون هارمونیک ها و برای جبران سازی توان راکتیو راه اندازی می شود. یک SC در هر ایستگاه مبدل به کار می رود تا با فیلترهای AC همکاری کند. در این مطالعه، تاثیر مرکز بار در جانب مبدل HVDC مورد غفلت قرار می گیرد، و این بعنوان سیستم AC قدرتمند در نظر گرفته می شود. یک منبع ولتاژ ثابت متشکل از یک امپدانس منبع بعنوان مرکز بار برای ساده سازی آنالیز استفاده می شود [1].

## 2.1 سیستم PMSG

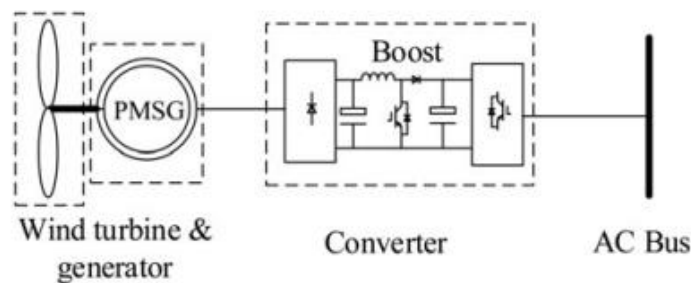
مدل دقیق PMSG در [12] بحث میشود. مدل PMSG به کار رفته بصورت مختصر در اینجا ارائه شده است. توپولوژی سیستم PMSG در شکل 2 نشان داده شده است. توربین بادی بصورت مستقیم به PMSG متصل می-شود، که بیشتر به یک مبدل تمام کنترل شده تغذیه میشود. این شامل یک یکسوساز مدولاسیون عرض پالس (PWM)، یک مدار متوسط سرعت و یک مبدل PWM است، تا عملکرد خروجی قدرت را بهبود بخشد. روش کنترل PWM استفاده شده برای ارائه خروجی ولتاژ ثابت است. همچنین، ردیابی حداکثری قدرت در سیستم کنترل به کار می-رود.

در حالی که سرعت باد تغییر می-کند، قدرت مکانیکی تولید شده توسط یک توربین بادی به شرح زیر تعریف می-شود:

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho A c_p v_w^3 \quad (1)$$



شکل 1. طرح ساختاری سیستم مطالعه شده



شکل 2. ساختار سیستم PMSG

که در آن  $\rho$  تراکم هوا است،  $A$  جاروب منطقه است،  $c_p$  نسبت قدرت بادی توسط قدرت توربین است و  $v_w$  سرعت بادی است.

نسبت سرعت نوک  $\lambda$  به شرح زیر تعریف میشود:

$$\lambda = \frac{\Omega R_b}{v_w} \quad (2)$$

که در آن  $R_b$  شعاع توربین است و  $\Omega$  سرعت دورانی توربین است.

در نتیجه، قدرت توربین حداکثری توسط تابعی از سرعت دورانی توربین بهینه تعریف می شود

$$P_{\max} = \frac{(1/2)\rho\pi R_b^5 c_p \max}{\lambda_{op}^3} \Omega_{op}^3 \quad (3)$$

با به کار بردن مقادیر بهینه  $\lambda$  و  $\Omega$  و تنظیم  $c_p$  برای مقدار بیشینه، زمانی که مقررات سیستم مشخصات محدوده قدرت را برآورده می کند، ردیابی قدرت بیشینه تحقق می یابد.

## 2.2 سیستم HVDC

مدل HVDC ارائه شده مبتنی بر مدل بنچمارک CIGRE HVDC است، که در آن کنترل قطب در سیستم کنترل HVDC ادغام می یابد [13].

مبدل 12 قطبی در هر دو یکسوساز و مبدل استفاده می شود. یکسوساز کنترل جریان DC ثابت و کنترل زاویه آتش زنی ثابت را به کار می برد، در حالی که کنترلر اینورتر متشکل از کنترل ولتاژ DC ثابت، کنترل محدودساز مرتبه جریان ولتاژ مستقل و کنترل زاویه انقراض ثابت است. همپوشانی تعویض و تغییر و همچنین تاثیر تغییر تپ در آنالیز نادیده گرفته می شود.

### 3. کنترل توان راکتیو هماهنگ

در سیستم LCC-HVDC برای انتقال نیروی باد، مقدار تنظیم توان اکتیو DC را می توان به سرعت تنظیم کرد تا با خروجی نوسان نیروگاه های بادی هماهنگ شود. به طور سنتی، فیلترهای AC باید برای حفظ تعادل توان راکتیو نیز عمل کنند. با این حال، اگر قدرت باد به طور مکرر در نوسان باشد، زمان عملکرد فیلترهای AC افزایش می یابد. در همین حال، به دلیل تعویض فیلتر AC، تنظیم ناپیوسته است. استفاده از SC به عنوان RPCD برای همکاری با فیلترهای AC قادر به تحقق RPC مداوم و کاهش زمان عمل فیلترهای AC خواهد بود.

#### 3.1. تعیین ظرفیت RPCD

الزام به جبران سازی توان راکتیو سیستم DC به توان راکتیو مصرف شده توسط مبدل بستگی دارد، که در آن ظرفیت و گروه بندی RPCDS را میتوان مشخص نمود.

توان راکتیو مصرف شده توسط مبدل را می توان به شرح زیر محاسبه نمود:

$$Q_{dc} = P \tan \varphi \quad (4)$$

$$\tan \varphi = \frac{(\pi/180)\mu - \sin \mu \cos(2\alpha + \mu)}{\sin \mu \sin(2\alpha + \mu)} \quad (5)$$

$$\mu = \cos^{-1} \left( \cos \alpha - \frac{\sqrt{2}X_c Id}{E_{11}} \right) - \alpha \quad (6)$$

که در آن P توان اکتیو DC است، زاویه قدرت مبدل است، زاویه آتش زنی یکسوساز است، زاویه ارتباطاتی است، جریان DC از مبدل است،  $X_c$  راکتانس تغییری از ترانسفورماتور مبدل است و  $E_{11}$  ولتاژ خط جانب مقدار در ترانسفورماتور مبدل است.  $\alpha$  باید توسط جایگزین شود در حالی که مبدل بعنوان اینورتر ر می کند.

برای فیلترهای AC، PRCD اصلی در ایستگاه های مبدل، توان راکتیو تولید شده عبارت است از

$$Q_{filt} = \left( \frac{U_{ac}}{U_{acN}} \right)^2 \sum Q_{filtV} \quad (7)$$

که در آن ظرفیت گروهی فیلترهای AC است، rms واقعی ولتاژ خط از باس AC در مبدل است و رتبه بندی آن می باشد.

ظرفیت و گروه‌بندی فیلترهای AC با اصول مهندسی تعیین و مشخص می‌گردد. کنترل سوئیچینگ فیلترهای AC اجتناب از سوئیچینگ مکرر دستگاه را در نظر می‌گیرد، در نتیجه منطقه مرده یک واحد فیلتر AC بایستی تعریف شود. در حالت معمول، مقدار بعنوان ایجاد می‌شود.

SC بعنوان RPCD دینامیکی در سیستم ادغام می‌شود. ظرفیت آن باید نیاز به تنظیم مستمر، با حاشیه کافی را برآورد سازد، و همچنین بایستی اقتصادی لحاظ گردد. مقدار بین (منطقه مرده واحد فیلتر سوئیچینگ) و است، و برای ایجاد می‌شود.

در نتیجه، مبادله توان راکتیو در باس AC از مبدل را می‌توان به شرح زیر تعریف نمود:

$Q_{ref}$  توان راکتیو ارائه شده توسط SC است. هدف حفظ  $Q_{exc}$  با مقدار کمینه و تحقق تنظیمات مداوم است.

### 3.2. استراتژی RPC هماهنگ

جریان استراتژی RPC ارائه شده در یک دوره در شکل 3 نشان داده شده است. چرخه محاسبه با 0.5 s تنظیم می‌شود. نخست، مبادله توان راکتیو جریان  $Q_{exc}$  توسط سیگنال‌های اندازه‌گیری شده در سیستم AC/DC محاسبه می‌شود. در حالی که  $Q_{exc}$  برابر با 0 است، هیچ PRCD فعالیت نمی‌کند. بعبارتی دیگر، اختلاف بین  $Q_{exc}$  و تقاضای توان راکتیو  $Q_{ref} - Q_{exc}$  مشخص می‌شود. در نتیجه، اگر تفاوت تحت محدوده  $\pm Q_{exc}$  باشد، توان راکتیو ارائه شده یا جذب شده توسط SC از  $Q_{ref}$  به  $Q_{ref} - Q_{exc}$  تنظیم می‌شود. با اینحال، اگر اختلاف فراتر از محدوده باشد، فیلتر AC بایستی تغییر یابد.

(الف) اگر شرایط زیر برآورده شود، یک فیلتر AC سوئیچ می‌شود در:

$$\begin{cases} Q_{exc} = Q_{filt} - Q_{dc} + Q_{ref} < 0 \\ Q_{ref} - Q_{exc} \geq Q_{esc} \end{cases} \quad (9)$$

(ب) همچنین، در نظر گرفتن  $Q_{exc}$  توسط  $Q_{filN}$  پس از یک واحد فیلتر سوئیچ شده افزایش می‌یابد، توان راکتیو SC باید مجدداً برای  $(Q_{exc} - Q_{filN})$  تنظیم شود.



(ج) (ب) اگر که شرایط زیر ارضا شود، یک فیلتر AC سوئیچ میگردد:

$$\begin{cases} Q_{exc} = Q_{filt} - Q_{dc} + Q_{cref} \\ Q_{cref} = -Q_{csc} \end{cases} \quad (10)$$

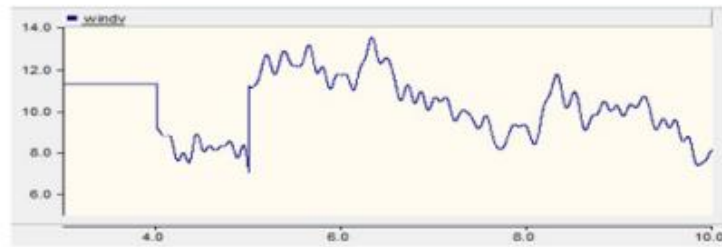
(د) همچنین لحاظ کردن  $Q_{exc}$  توسط  $Q_{filt}$  پس از یک واحد فیلتر AC سوئیچ شده کاهش مییابد، توان راکتیو SC باید برای  $Q_{exc} - Q_{filt}$  مجدداً تنظیم شود.

#### 4. نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی

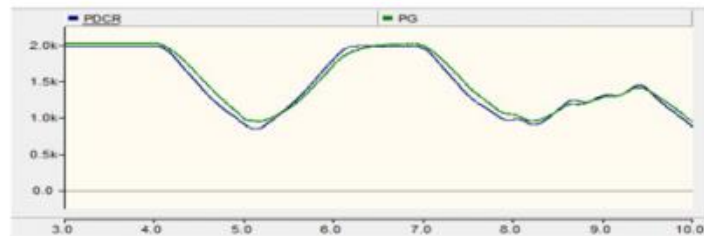
شبیه‌سازی با استراتژی کنترل ارائه شده توسط PSCAD/EMTDC برای یک مزرعه بادی 200 مگاوات PMSG با استفاده از لینک‌های LCC-HVDC انجام می‌شود. خروجی قدرت مزرعه بادی و همچنین تقاضای توان راکتیو در ایستگاه‌های مبدل نوسان می‌یابد. پارامترهای مربوط به سیستم مطالعه شده در جدول 1 داده شده است. در جانب اینورتر، تنها فیلترهای AC بعنوان RPCD برای ساده‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شتاب باد در طول شبیه‌سازی تغییر پیدا می‌کند همانطور که در شکل 4 نشان داده شده است، که حاوی مولفه تندباد، باد رمپ یا پلکانی و باد نویز است. در ابتدا سرعت باد با مقدار رتبه‌بندی خودش یعنی 11.3 m/s تنظیم می‌شود. پس از 1 ثانیه، یک افت ناگهانی از 11.3 تا 9 m/s وجود دارد و در نتیجه این امر ادامه می‌یابد تا به 7.5 m/s برسد و سرعت باد بین 7.5 و 9 متر بر ثانیه در نوسان است. بنابراین پس از 1 ثانیه، ناگهانی سرعت به 11.3 m/s افزایش می‌یابد و در 15 ثانیه به بیشتر از 13.5 متر بر ثانیه می‌رسد، در نتیجه سرعت باد نوسانی بین 8 و 11.3 m/s را در طول 3.5 ثانیه تجربه می‌کند.

**Table 1** Parameters of the simulated system in PSCAD

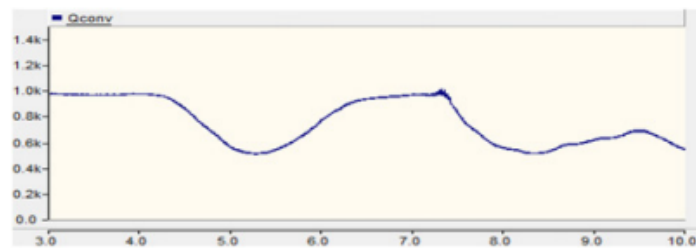
$P_{dN}$ (rated capacity of HVDC)	2000 MW (monopole)
$U_{dc}$ (DC voltage of HVDC)	$\pm 660$ kV
$U_{ac}$ (AC bus voltage)	345 kV (rectifier), 500 kV (inverter)
$Q_{csc}$ (capacity of the SC)	150 MVar
$S_m$ (capacity of the converter transformer)	1200 MVA (rectifier), 1150 MVA (inverter)
$X_m$ (commutated reactance of the converter transformer)	12.18 $\Omega$ (rectifier), 10.92 $\Omega$ (inverter)
$Q_{filN}$ (smallest group capacity of AC filters)	200 MVar (rectifier), 180 MVar (inverter)



**Fig. 4** Simulation result of wind speed



**Fig. 5** Power output of the wind farm and DC power



**Fig. 6** Reactive power demand at the rectifier

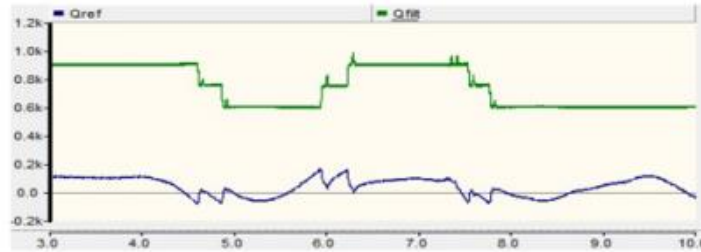


Fig. 7 Reactive power supplied by RPCDs

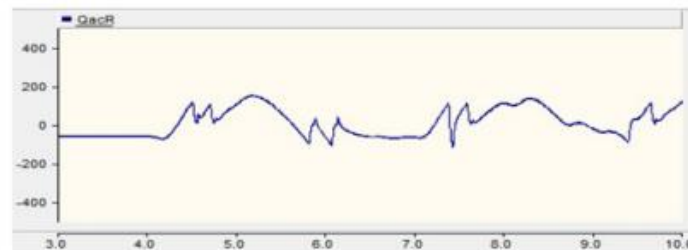


Fig. 8 Reactive power exchange

(الف) خروجی توان اکتیو: خروجی توان مزرعه بادی از و توان DC در شکل 5 نشان داده شده است. خروجی توان مزرعه بادی متفاوت از سرعت باد است. در حالت پایدار، مقدار 200 MW است، و زمانی که سرعت باد تا 9 متر بر ثانیه کاهش می‌یابد این مقدار تا 800 مگاوات کاهش می‌یابد. در نتیجه، این مقدار تا 200 مگاوات افزایش می‌یابد و سپس دچار افت و نوسان می‌شود. قدرت DC با خروجی قدرت باد با تغییر جزئی در تاخیر در اطراف 0.1 ثانیه حفظ می‌شود.

(ب) خروجی توان راکتیو: خروجی توان راکتیو مزرعه بادی در شبیه‌سازی برای صفر کنترل می‌شود. نتیجه شبیه‌سازی تقاضای توان راکتیو در جانب یکسوساز در شکل 6 نشان داده شده است. با توجه به تغییر توان انتقالی DC، تقاضای توان راکتیو یکسوساز نیز تغییر می‌یابد.

توان راکتیو توسط فیلترهای AC تغذیه و تامین قدرت می‌شود و SC از نوسانات تقاضای توان راکتیو پیروی میکند. توان راکتیو تغذیه شده توسط فیلترهای AC و SC در شکل 7 نشان داده شده است. توان راکتیو تولید شده توسط فیلترهای AC stair-stepping است در حالی که کنترل SC مستمر و مداوم است. نتیجه شبیه‌سازی مبادله توان راکتیو در شکل 8 نشان داده شده است. اگر نسبت به ظرفیت SC مزیت و برتری ندارد، پس SC صرفاً سریع

فعالیت میکند تا تعادل توان را حفظ کند. عبارتی دیگر، فیلتر(های) AC سوئیچ میشود. با توجه به نتیجه شبیهسازی در شکل 8، مبدله توان راکتیو کنترل میشود تا نسبتا کوچک (نه بیشتر از 160 MVar) باشد و تنظیمات نیز مستمر میباشد.

## 5. نتیجه گیری

این مقاله استراتژی RPC هماهنگ در سیستم قدرت بادی در مقیاس بزرگ را با اتصال LCC-HVDC ارائه می-کند. PC با فیلترهای AC و یک SC بعنوان RPCD ارائه می شود و کنترلرهای مرتبط ادغام می شود. مرکز بار در جانب اینورتر بعنوان سیستمی قدرتمند در نظر گرفته می شود و پاسخ مطلوب می باشد.

ظرفیت SC با نیاز به تنظیم مستمر و مداوم مشخص میشود و صرفه جویی در هزینه نیز لحاظ می شود. SC راه-اندازی شده قبل از فیلترهای AC عمل می کند تا تقاضای توان راکتیو سریع متغیر را برآورده کند بدین منظور که تعادل توان راکتیو را حفظ نماید. در حالی که مبدله توان راکتیو فراتر از ظرفیت SC است، فیلترهای AC سوئیچ می شود و همچنین SC نیز فعالیت می کند. شبیه سازی از یک مزرعه بادی 2000 MW توسط لینک LCC-HVDC در PSCAD/EMTDC انجام می شود. نتایج شبیه سازی اثربخشی استراتژی ارائه شده را تأیید می کند.

## References

- [1] Baroudi J.A., Dinavahi V., Knight A.M.: 'A review of power converter topologies for wind generators'. IEEE Int. Conf. Electric Machines Drives, 2005, pp. 458–465
- [2] Perveen R., Kishor N., Mohanty S.R.: 'Off-shore wind farm development: present status and challenges', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2014, 29, pp. 780–792
- [3] Nguyen T.H., Lee D.C., Kim C.K.: 'A series-connected topology of a diode rectifier and a voltage-source converter for an HVDC transmission system', *IEEE Trans. Power Electron.*, 2014, 29, (4), pp. 1579–1584
- [4] Dai R., Davis Hwang M., Qiu W., ET AL.: 'EMS experience of reactive power control for LCC based HVDC system'. IEEE Power Energy Society General Meeting, September 2015
- [5] Xue Y., Zhang X.P.: 'Reactive power and AC voltage control of LCC HVDC system with controllable capacitors', *IEEE Trans. Power Syst.*, 2017, 32, (1), pp. 753–764
- [6] Lee G., Moon S., Kim R., ET AL.: 'Reactive power control operation scheme of LCC-HVDC for maximizing shunt capacitor size in AC systems'. Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC, 2015, pp. 1–5
- [7] Li Y., Luo L., Rehtanz C., ET AL.: 'Realization of reactive power compensation near the LCC-HVDC converter bridges by means of an inductive filtering method', *IEEE Trans. Power Electron.*, 2012, 27, (9), pp. 3908–3923
- [8] Elmehdi A., Momen A., Johnson B.K.: 'Dynamic reactive compensation requirements at the rectifier end of an LCC HVDC link connected to a weak AC system'. 2014 North American Power Symp, NAPS 2014, 2014
- [9] Yin H., Fan L., Miao Z.: 'Coordination between DFIG-based wind farm and LCC-HVDC transmission considering limiting factors'
- [10] Yunhao Z., Yi X., Wenqin S., ET AL.: 'Coordinated control strategy and configuration scheme of RPCD of DC system for wind-thermal-bundled power transmission', *Power System Technology*, 2016, 40, (7), pp. 2081–2086
- [11] Franken B., Andersson G.: 'Analysis of HVDC converters connected to weak AC systems', *IEEE Trans. Power Syst.*, 1990, 5, (1), pp. 235–242
- [12] Chinchilla M., Arnaltes S., Burgos J.C.: 'Control of permanentmagnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid', *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2006, 21, (1), pp. 130–135
- [13] Szechtman M., Wess T., Thio C.V.: 'A benchmark model for HVDC system studies'. Int. Conf. AC and DC Power Transmission 1991, 1991, pp. 374–378