

# کنترل هماهنگ مزارع بادی ساحلی و مبدل HVDC برای میرایی نوسان برق

چکیده:

نقش میرایی مزارع بادی (WF) به یک لازمه اجباری و ضروری به صورت بخشی از کدهای شبکه تبدیل شده است. برای مزارع بادی ساحلی دور دست که از طریق حلقه جریان مستقیم مبتنی بر مدل منبع ولتاژ متصل می‌شود راحت ترین گزینه برای اپراتور سیستم انتقال ساحلی تنظیم و تعديل قدرت واکنشی در VSC در قلمرو آن‌ها است. در این مقاله ما نشان می‌دهیم که کنترل مکمل از طریق VSC ساحلی، می‌تواند منجر به تغییرات ولتاژ نامطلوب در شبکه شود. از سوی دیگر، تنظیم خروجی قدرت فعال ژنراتورهای توربین بادی به دلیل ظرفیت سربار محدود WTG ناکافی است. کنترل هماهنگ در VSC ساحلی و خروجی WF بر محدودیت‌های فوق غلبه کرده و برای میرایی نوسان برق موثر است. یک رویکرد هموتوپی برای طراحی کنترل گر هماهنگ استفاده می‌شود که در مقیاس محلی با استفاده از یک معماری غیر متمنکز پیاده سازی می‌شود. این یک مسئله نامساوی ماتریس دو خطی می‌باشد که به تبدیل این محدودیت‌ها به محدودیت‌های خطی کمک می‌کند. مطالعات موردی در خصوص سیستم‌های ازمایشی نشان می‌دهد که کنترلگر پیشنهادی منجر به پاسخ دینامیک سیستم به صورت کنترل مکمل از طریق WF می‌شود.

**کلمات کلیدی:** نامساوی ماتریس دو خطی، کنترل غیر متمنکز، هموتوپی، HVDC، نامساوی ماتریس خطی، باد ساحلی، میرایی نوسان توان، باقی مانده، مبدل منبع ولتاژ

## ۱- مقدمه

توانایی مزارع بادی ساحلی متصل به جریان مستقیم ولتاژ مبتنی بر مبدل منبع (VSC-HVDC) برای رایه سرویس‌های کمکی، یک ملاحظه مهم برای سیستم‌های با نفوذ بادی بالا است. با افزایش تعداد تاسیسات توربین بادی دریایی در سرتاسر جهان، اپراتورهای سیستم انتقال (TSO) ملزمات کد شبکه اصلاح شده را برای اتصال به نیروگاههای باد را ایجاد کرده‌اند. این کدهای شبکه [1] نیاز به مزارع بادی برای ارائه خدمات جانبی مانند پشتیبانی درونی و تنظیم فرکانس دارند که معمولاً از ژنراتورهای همگام استفاده می‌شود. شبکه اروپایی اپراتورهای سیستم

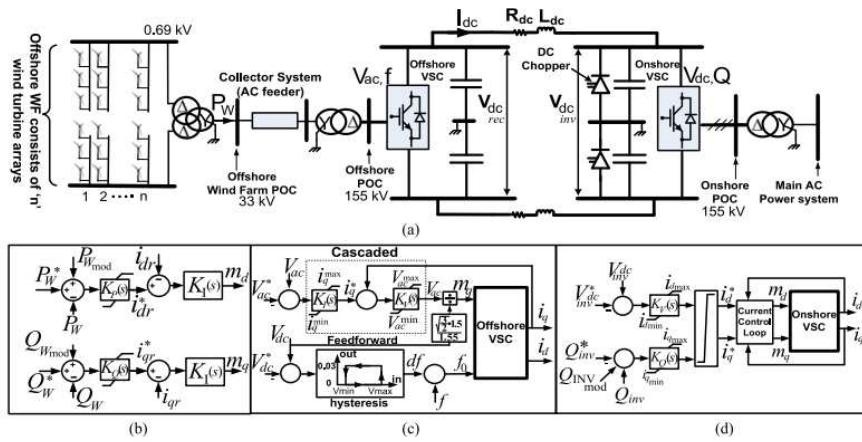
انتقال (ENTSO-E) کد شبکه ای را برای اتصالات HVDC و مازول های پارک پاور (DCM) متصل کرده است که شامل فراهم کردن نوسان نوسان برق (POD) از طریق PPM ها و هماهنگی آنها است. نیاز به چنین کدهای شبکه در آینده نیز در [2] مشخص شده است.

نوسان برق از طریق PSS مبتنی بر WF در مطالعات [3] - [10] گزارش شده است، بیشتر در زمینه توربین های بادی ساحلی به طور مستقیم به شبکه AC متصل می شوند. توجه بسیار کمتری به مشارکت در کاهش نوسان نوسان برق از WF دریایی متصل شده به شبکه ساحلی از طریق لینک VSC-HVDC متمرکز شده است. در [11]، عوامل موثر بر قابلیت مهار VF-HVDC متصل به دریای WF به دقت مورد توجه قرار گرفته است. تعاملات بالقوه با AVR ها در سیستم در عمق مورد بررسی قرار گرفت. یک روش تقسیم فازی کلاسیک برای به دست آوردن پارامترهای POD استفاده شده است، که برای یک سیستم ساده با یک حالت ضعیف خم شده روشنگری است. با این وجود، این روش را برای سیستم های پیچیده تر با چندین حالت ضعیف درون محدوده منطقه ای آسان نمی کند. همچنان، هماهنگی بین مدولاسیون قدرت فعال و راکتیو در [11] مورد توجه قرار نگرفته است. در این مقاله یک روش سیستماتیک برای طراحی یک POD هماهنگ شده (از این به بعد به نام PSS هماهنگ شده)

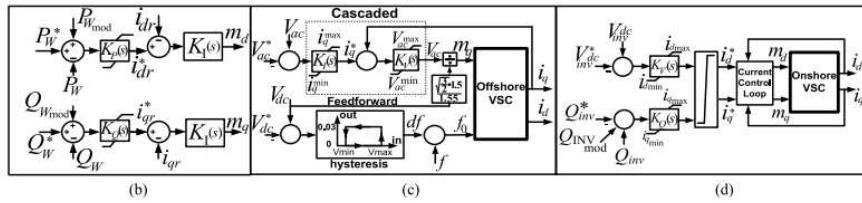
نشان داده شده است تا بهبود حالت های چندین منطقه را کاهش دهد (مطالعه موردي II در بخش VI).

برای WF های از راه دور ساحلی، که از یک لینک DC DC مبتنی بر VSC به یک سیستم انتقال متصل هستند، گزینه ترجیح داده شده برای TSO در ساحل، تغییر توان راکتیو در ایستگاه VSC در ساحل است. این موجب عدم نیاز به کنترل تکمیلی WF و در نتیجه وابستگی به مالک انتقال دریایی (OFTO) می شود. با این وجود، این می تواند منجر به تغییرات غیر قابل قبول ولتاژ در شبکه برق ساحلی شود که در این مقاله نشان داده خواهد شد. از سوی دیگر، مدولاسیون خروجی قدرت فعلی ژنراتورهای توربین بادی (WTG) تنها به دلیل محدود بودن کوتاه مدت (چند درصد برای چند ثانیه) قابلیت اضافه بار پویا خاص WTG ها در هنگام کار در بخش یا محدوده کامل بار (12) را داردند. برای مقابله با مشکلات فوق، کنترل هماهنگی مرجع قدرت واقعی دریایی WF و مرجع توان راکتیو مبدل VSC-HVDC در ساحل پیشنهاد شده است. یک رویکرد برای دستیابی به کنترل هماهنگ، طراحی همگام

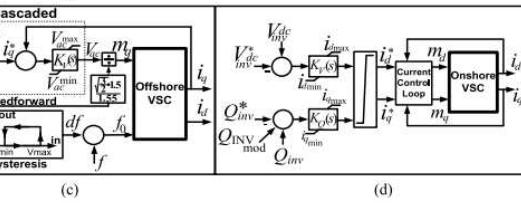
حلقه های کنترل در یک چارچوب چند متغیره است [13]، [14]. با این وجود، کنترل کننده کامل ساختار در یک معماری غیرمت مرکز به سختی اجرا می شود، زیرا به تمام سیگنال های بازخورد نیاز دارد که ممکن است بعضی یا همه آنها از مکان های دور باشد تا به هر مکان محرک انتقال یابد. از سوی دیگر، اگر ساختار کنترل مورب باشد، حلقه های کنترل فرد از یکدیگر جدا می شوند، که ساده تر در معماری غیر مت مرکز اجرا می شود. در اینجا مفهوم (15) مورد استفاده قرار می گیرد و یک فرمت پیشنهاد شده برای به دست آوردن یک کنترل کننده بلوک مورب از یک کنترل کامل ساختار طراحی شده برای اطمینان از عملکرد حلقه بسته مشخص شده است.



(a)



(b)



(c)



(d)

شکل 1 (الف) یک طرح WF دریایی که به شبکه AC سرپوشیده از طریق لینک VSC-HVDC متصل شده است، (ب) کنترل کنتاکتور روتور سوئیچ WF (RSC)، (ج) مبدل دریایی فرکانس - کنترل (د) در ساحل مبدل Vdc - Q کنترل . گزینه های کنترل برای PSS تکمیلی از طریق WF و HVDC نشان داده شده است.

سهم اصلی این مقاله عبارتند از:

- 1) کنترل هماهنگی مزرعه بادی دریایی و VSC در ساحل برای مهار نوسان نیروی قدرت پیشنهاد شده است و برای اولین بار نشان داد.
- 2) روش هوموتوپی برای طراحی کنترل هماهنگ با ساختار کنترل غیرمت مرکز اعمال می شود.
- 3) فرمول سازی طراحی هوموتوپی گسترش یافته است تا شرایط کار چندگانه برای استحکام طراحی را در نظر

بگیریم.

سازماندهی این مقاله به شرح زیر است: اول، مدلسازی و کنترل VSC-HVDC-متصل به منابول دریایی با استفاده از گزینه های مختلف PSS ها و محدودیت های عملیاتی آنها ارائه شده است. در ادامه، طراحی PSS های هماهنگ با قطر قطبی قوی با استفاده از روش هوموتوپی توصیف می شود. در نهایت، دو مطالعه موردی به ترتیب در 4 دستگاه، 2 منطقه و 14 دستگاه و 5 سیستم منطقه ای ارائه شده است. نتایج شبیه سازی اثربخشی رویکرد هماهنگ پیشنهادی را نشان می دهد.

## II) مدل سازی و کنترل VSC-HVDC مرتبط با خلیج فارس

(a) یک مزرعه بادی دریایی (WF) به یک شبکه AC متصل شده از طریق لینک VSC-HVDC در شکل 1 نشان داده شده است. سیستم VSC-HVDC و مبدل ها با استفاده از مدل میانگین آنها ارائه شده اند که می توانند به طور واضح ویژگی های فرکانس پایین چند وجهی یا سطح 2 PWM را نشان دهند حتی اگر تفاوت فرکانس سوئیچ مشخص شده باشد. تفاوت بیشتر در تهیه فیلتر و کنترل داخلی تعادل انرژی در نظر گرفته نشده و طرح خاصی است. مدل WF یک مدل WTG نوع 3 است که شامل مدل کنترل آبرودینامیکی، زمین و نیروگاه می باشد. توصیف مدل سازی و اجرای کنترل در نیروگاه نیروی [17] DIGSILENT عمدتاً به صورت مختصر نگهداری می شود - خوانندگان به [16]، [18] اشاره می شوند.

(b) توربینهای دریایی: توربین های بادی فردی بر پایه ژنراتور القایی با دوبار تغذیه (DFIG) و با یک مدل جمع شده ارائه می شوند . یک نماد ساده کنترل کننده مبدل روتور (RSC) با حلقه های کنترل جریان جریان در شکل 1 نشان داده شده است RSC. کنترل خروجی واقعی (PW) و توان راکتیو WF (QW) را کنترل می کند . ورودی کنترل QW mod و PW mod می تواند برای کنترل تک تک PSS استفاده شود.

(c) Offshore VSC Controls: Offshore VSC می کند . محدودیت های عملیاتی بیشتر در حلقه های کنترل اعمال شد (i) : اصطلاح تغذیه برای تغییر DC منتقل می کند . فرکانس در مورد بیش از ولتاژ در کابل DC ، سیگنالینگ توربین های بادی برای کاهش قدرت خروجی خود و (ii)

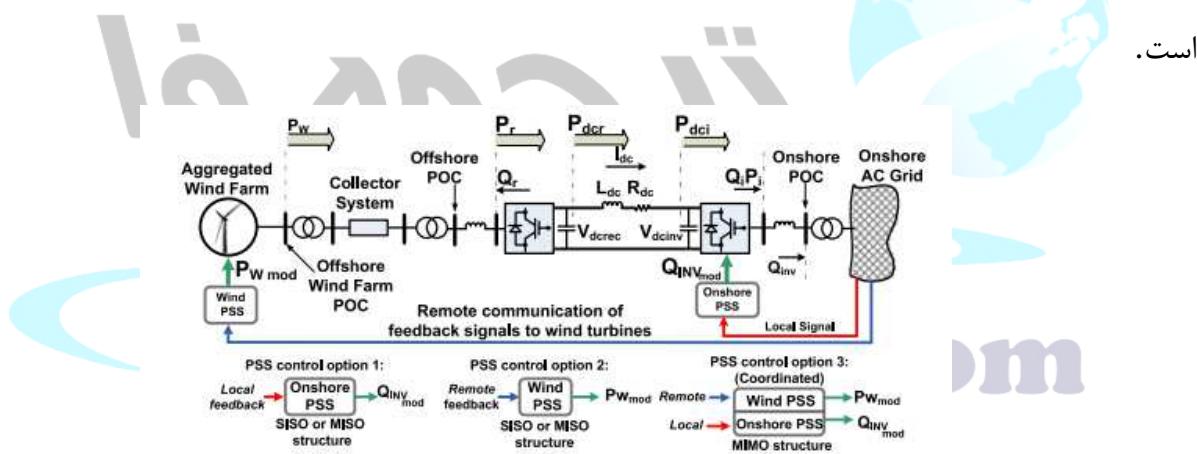
در صورت خطا در دریای خزر، جریان تنها نمی تواند محدود شود اگر یکسوساز تنها مقدار ولتاژ را کنترل کند. یک کنترل cascaded در حلقه ولتاژ کنترل در نظر گرفته شده، شکل 1(c).

(3) VSC کنترل در ساحل VSC: در ساحل در حالت  $V_{dc}-Q$  ، با حفظ ولتاژ مدار DC ثابت و ضریب توان وحدت در نقطه اتصال (POC)، همانطور که در شکل 1(d) نشان داده شده، در  $V_{DC}-Q$  عمل می کند. استراتژی کنترل فعلی جدا شده در فریم مرجع  $q - d$  و کنترل کننده های استاندارد PI مورد استفاده قرار گرفت.

QINV mod می تواند برای مدولاسیون اضافی  $Q^{*} \text{inv}$  به سمت نوسانات نوسان برق استفاده شود.

### III) مزرعه وحشی و VSS-HVDC مبتنی بر PSS: انتخاب و محدودیت های عملیاتی

چندین گزینه برای طراحی PSS برای WF دریایی متصل از طریق لینک VSC-HVDC وجود دارد، همانطور که در شکل 2 نشان داده شده است. انتخاب گزینه های کنترل و مفاهیم عملی آنها در زیر بخش های زیر بر جسته شده است.



شکل 2. دو گزینه کنترل PSS برای VF-HVDC متصل به دریایی WF نشان داده شده است. سیگنال های بازخورد با استفاده از محلی (قرمز) و از راه دور (آبی) نشان داده شده است.

#### الف. گزینه کنترل I: HVDC PSS در ساحل (TSO Preferred)

مناسب ترین گزینه برای اپراتور سیستم انتقالدر ساحل (TSO) این است که توان راکتیو (QINV mod) را در ساحلی در حوزه قضایی خود تغییر دهید (همانطور که در شکل 2 نشان داده شده است). این مانع از نیاز به کنترل اضافی WF خارج از ساحل و در نتیجه، هیچ وابستگی به مالک انتقال دریایی (OFTO) تقریبا هیچ

تأثیری روی مزرعه بادی وجود ندارد (به عنوان مثال تغییرات دینامیکی در خروجی های فعال، سرعت توربین و ولتاژ پیوند DC وجود ندارد)، اما توان راکتیو در ساحل و ولتاژ AC در دریای ساحلی تغییرات دینامیکی بیشتری را تجربه خواهند کرد. مدولاسیون ولتاژ DC امکان پذیر است، اما در عمل عمل مطلوب نیست. اندازه گیری های محلی در ایستگاه مبدل جغرافیایی می تواند به عنوان سیگنال بازخورد مورد استفاده قرار گیرد. مدولاسیون مرجع توان راکتیو مبدل جغرافیایی از اینجا به بعد به نام PSS ساحلی نامیده می شود.

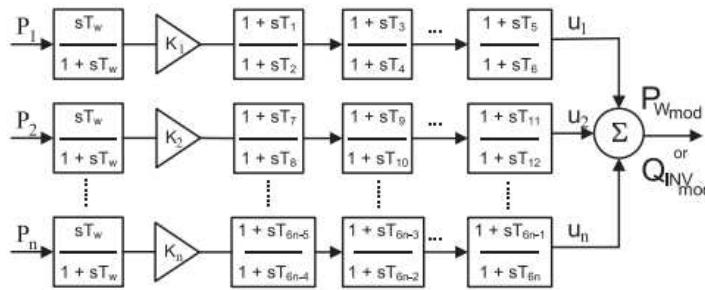
### ب) گزینه کنترل II: PSS مبتنی بر WF خارج از ساحل

یک گزینه جایگزین این است که خروجی قدرت فعلی مزرعه بادی دریایی را مدوله کند - از این به بعد به عنوان PSS Wind اشاره می شود. از آنجایی که پایان دریایی به طور همگام به شبکه ساحلی متصل نیست، نوسانات بین محدوده در آن دیده نمی شود. از این رو، PSS باد نیاز به ارتباط از راه دور از سیگنال بازخورد از انتهای ساحلی دارد و به همین دلیل آسیب پذیر به مشکلات (مثلاً تاخیر) در کانالهای ارتباطی است. به همین علت، یک مدل تاخیر زمانی (تقریبی) باید در PSS Wind برای نشان دادن تاخیرهای زمانی مرتبط با اندازه گیری های گسترده در نظر گرفته شود. مدولاسیون قدرت واقعی WF PW همانطور که در شکل 1 (a) نشان داده شده، تنها کاندید مناسب برای مهار نوسان نوسان است. نادیده گرفتن خسارت مبدل و ظرفیت کابلی و فرض بر ردیابی کامل:

$$V_{dcinv} = \frac{V_{dcinv}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{V_{dcinv}^2 + 4R_{dc}(P_W - P_{loss})} \\ + \frac{L_{dc}}{2R_{dc}} \frac{d}{dt} \left\{ \sqrt{V_{dcinv}^2 + 4R_{dc}(P_W - P_{loss})} \right\} \quad (1)$$

توجه داشته باشید که کنترل اینورتر DC ولتاژ ثابت Vdcinv را حفظ می کند. مفروضات در این استنتاج این است که پویایی ولتاژ DC dd / dt در خازن پایه یکساله نادیده گرفته می شود. معادله (1) نشان می دهد که مدولاسیون بزرگتر در PW، تغییرات بیشتر در ولتاژ پیوند DC پایه ای یکسوال بالاتر است. از دیدگاه عملیاتی، تغییرات زیادی در ولتاژ DC-link مطلوب نیست. محدودیت بالا به علت رتبه بندی کابل و محدود بودن پایین با اشباع شاخص های مدولاسیون کنترل های مبدل محدود شده است. مسائل مربوط به تنوع ولتاژ DC-link یکسو کننده، امتیاز مبدل و تغییرات مجاز سرعت توربین، نیاز به هماهنگی کنترل در میان مزرعه بادی دریایی و VSC-

HVDC را تعیین می کند .ساختار کنترل عمومی برای گزینه های کنترل I ، PSS II در شکل 3 نشان داده شده است.



شکل 3: بلوک عمومی ورودی n-1، کنترل کننده خروجی 1 (گزینه های کنترل I، II).

### ج) گزینه کنترل III: PSS هماهنگ شده

طراحی هماهنگ با استفاده از هر دو  $P_{W\text{ mod}}$  و  $Q_{\text{INV}\text{ mod}}$  به عنوان ورودی های کنترل می تواند در نظر گرفته شود - از این پس به عنوان PSS هماهنگ شناخته می شود. نکات زیر قابل توجه است:

1) وظیفه مخرب کلی در میان مدولاسیون  $Q_{\text{inv.}}^*$  و  $P_W^*$  توزیع خواهد شد.

2) برای عملکرد همانند کمینه سازی، PSS هماهنگ شده از تغییرات کمتر از توان راکتیو در سرزمین و ولتاژ ولتاژ AC نسبت به PSS ساحلی) گزینه کنترل (I استفاده می کند و همچنین مدولاسیون را در کاهش می دهد در مقایسه با با استفاده از باد PSS (گزینه کنترل II).

3) تغییرات ولتاژ DC-link در یک یکسو کننده کمتر به دلیل تغییرات کوچکتر در  $P_W^*$  دیده می شود که از (1) دیده می شود.

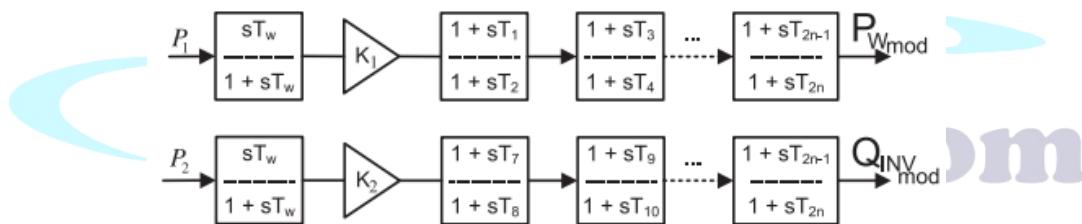
همانند گزینه کنترل II ، یک حلقه از PSS هماهنگ شده نیاز به ارتباط از راه دور از سیگنال بازخورد است، همانطور که در شکل 2 نشان داده شده است. چندین گزینه برای طراحی یک PSS هماهنگ وجود دارد (i: کنترل کننده مرکز (کامل MIMO (را می توان طراحی کرد . با این وجود، کنترل کننده هایی با چنین ساختاری به علت نیاز به ارتباط سیگنال های کنترل از راه دور به گیرنده های فردی رنج می برند، که موجب

تأخير و آسیب پذیری بالقوه سیگنال از دست دادن سیگنال می شود، یا ۲) ساختار کنترل کننده غیر متتمرکز (بلوک مونتاژ) که کنترل کننده ها به طور فیزیکی در سایت های محرك قرار گرفته است. مزایای دیگر غیر متتمرکز بر متتمرکز عبارتند از:

۱) سادگی ساخت افزاری: پیامدهای هزینه یک کنترلر غیر متتمرکز خیلی کمتر از یک کنترل متتمرکز است. یک کنترل متتمرکز برای  $n \times n$  کارخانه شامل  $n!$  توابع انتقال فردی تک ورودی-تک خروجی (SISO).

۲) پارامترهای تنظیم: معماری کنترل کننده غیر متتمرکز دارای پارامترهای بسیار کمتر است که موجب کاهش چشمگیری در زمان و هزینه تنظیم می شود.

۳) انعطاف پذیری و تحمل به نقص سیگنال: ساختار غیر متتمرکز اجازه می دهد تا TSO سیستم کنترل را با قرار دادن زیر سیستم ها در داخل و خارج از سرویس به صورت جداگانه به عنوان جدا، بر خلاف کنترل متتمرکز MIMO که دارای شرایط اتصال متقابل است. این می تواند ثبات بیشتری را فراهم کند، زیرا از دست دادن یک سیگنال روی حلقه های کنترل باقی مانده ورودی-خروجی تاثیر نمی گذارد.



شکل ۴: بلوک عمومی  $n$ -input,  $n$ -output (غیر متتمرکز) کنترل کننده (گزینه های کنترل III).

ساختار کنترل عمومی برای گزینه های کنترل PSS با در نظر گرفتن یک کنترل کننده MIMO که به مجموعه ای از کنترل کننده های جدا شده جدا شده است، در شکل ۴ نشان داده شده است.

این مقاله یک رویکرد هماتوپوپی قوی ارائه می دهد که مسائل فوق را مورد توجه قرار می دهد.

#### IV طراحی کنترل هماهنگ شده با استفاده از هوموتوپی

طراحی کنترل در دو مرحله صورت می گیرد. در مرحله اول، یک کنترل متتمرکز، (S) GC با استفاده از روش های گزارش شده در [13], [14] محاسبه می شود. در مرحله دوم، ماتریس ضربی کنترل، از ماتریس کامل ساختار

تعريف شده توسط یک کنترل متمرکز، به ماتریس ساختار بلوک ماتریس که توصیف یک کنترل غیر متمرکز،  $GD$  (s)، تغییر شکل داده می شود.

### الف) طراحی متمرکز (کامل ساختار) کنترل کننده

یک مدل سیستم خطی شده  $(s)$  که در فضای حالت ایالتی بیان می شود را به صورت زیر بیان کنید:

$$G_i(s) \triangleq \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & 0 \end{bmatrix}; \quad A \in \mathbb{R}^{n \times n}, B \in \mathbb{R}^{n \times m}, C \in \mathbb{R}^{m \times n} \quad (2)$$

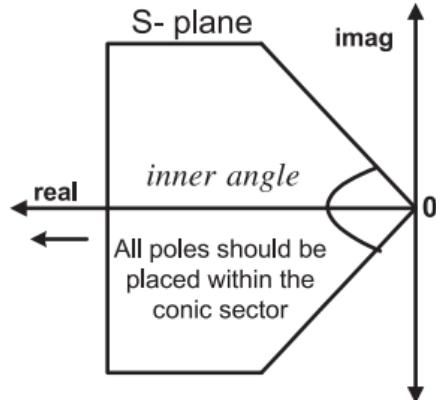
جایی که من شرایط عملیاتی  $i^{th}$  را نشان می دهم هدف این است که یک کنترل کننده بازخورد خطی متمرکز کنترل کامل  $G_{C_i}(s)$  سنتز کنیم، جایی که:

$$G_{C_i}(s) \triangleq \begin{bmatrix} A_{k_i} & B_{k_i} \\ C_{k_i} & 0 \end{bmatrix}; \quad A_k \in \mathbb{R}^{n \times n}, B_k \in \mathbb{R}^{n \times m}, C_k \in \mathbb{R}^{m \times n} \quad (3)$$

سیستم حلقه بسته توسط  $\dot{\tilde{x}} = \tilde{A}_i \tilde{x}$  نشان داده شده است، جایی که  $\dot{\tilde{x}} \in \mathbb{R}^{2n}$  مربوط به درون حالت

ترکیبی گیاه و کنترل کننده است.تابع انتقال بسته حلقه توسط  $T(s) = \tilde{C}_i(sI - \tilde{A}_i)^{-1} \tilde{B}_i$  با ماتریسهای  $\tilde{A}_i, \tilde{B}_i, \tilde{C}_i$  سیستم توسط:

$$\begin{bmatrix} \tilde{A}_i & \tilde{B}_i \\ \tilde{C}_i & \tilde{D}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i & B_i C_{k_i} & B_i \\ B_{k_i} C_i & A_{k_i} & 0 \\ C_i & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$



شکل 5. منطقه برای قطب های حلقه بسته با ،  $\zeta = \cos\theta$

برای تثیت (2) توسط (3)، پیدا کردن آکی،  $\tilde{P}_i > 0$ ،  $A_{k_i}, B_{k_i}, C_{k_i}$  و است، برای برقراری لیاپانوف:

$$\tilde{A}_i \tilde{P}_i + \tilde{P}_i \tilde{A}_i^T < 0 \quad (5)$$

نامساوی در معادله (5) نشان می دهد که ماتریس در سمت چپ یک ماتریس قطعی منفی است. با این حال، رعایت نامساوی در (5)، ثبات را فقط در صورتی که قطب در قسمت نیمه سمت چپ قرار دارد، تضمین کند. این مقاله به دنبال روشی است که در [13] برای رسیدن به یک کنترل کننده متتمرکز (کامل ساختار) در چارچوب نامساوی ماتریس خطی (LMI) پیگیری شده است. این روش چندین مورد عملی را با محدودیت هایی که شامل تضمین قطب های سیستم حلقه بسته شده درون یک بخش مخروطی قرار می گیرد را تضمین می کند، که حداقل نسبت میرایی  $\zeta = \cos\theta$  را نشان می دهد، نشان داده شده در شکل 5 سیستم حلقه بسته تضمین می کند که تمام قطب های آن در بخش مخروطی با انتهای ریشه در زاویه و زاویه داخلی  $\theta$  داشته باشند و فقط اگر یک ماتریس متقارن وجود داشته باشد که:

$$\begin{bmatrix} \sin\theta(\tilde{A}_i \tilde{P}_i + \tilde{P}_i \tilde{A}_i^T) & \cos\theta(\tilde{A}_i \tilde{P}_i - \tilde{P}_i \tilde{A}_i^T) \\ \cos\theta(\tilde{P}_i \tilde{A}_i^T - \tilde{A}_i \tilde{P}_i) & \sin\theta(\tilde{A}_i \tilde{P}_i + \tilde{P}_i \tilde{A}_i^T) \end{bmatrix} < 0 \quad (6)$$

نامساوی در (6) حاوی محصول  $\tilde{A}\tilde{P}$  است که توابع پارامترهای کنترل کننده  $A_k, B_k, C_k$  و پارامترهای کنترل کننده خودشان عملکرد  $\tilde{P}$  هستند. این باعث می شود که  $\tilde{A}\tilde{P}$  تبدیل به غیر خطی در  $\tilde{P}$  شود. به دنبال

تمریناتی که در [13]، [20] ارائه شده است، می توان مشکل را با تغییر متغیر کنترل کننده خطیر نمود. کنترل

$$G_{C_i}(s) = C_{ki}(sI - A_{ki})^{-1}B_{ki}$$

کننده متمرکز نتیجه به صورت  
بیان می شود.

### ب) طراح کنترلر (قطب نما)

در کنترل غیر متمرکز، مشکلات طراحی را نمی توان به یک مشکل احتمالی برای LMI به دلیل محدودیت ساختاری کنترل کننده، یعنی شکل بلوک های مورب از ماتریس ضریب، کاهش داد. از این رو، مفهوم هموگبا به کار رفته است. یک کنترل کننده بلوک مورب ایجنت را از یک کنترل کننده کامل ساختار به دست آورید. بین مقاله به گسترش رویکرد استاندارد هماتوپوپی پیشنهاد شده است که اجازه می دهد تا یک کنترلر متمرکز غیر متمرکز بلوک مورب از مجموعه ای از کنترل کننده های متمرکز تمام ساختار که به صورت جداگانه طراحی شده اند، برای اطمینان از عملکرد مشخصی از حلقه بسته تحت شرایط عملیاتی مربوطه آنها را فراهم کند.

اجازه می دهیم  $\tilde{A}_i$  را از (5) بازنویسی کنیم:

$$\tilde{A}_i \triangleq \underbrace{\begin{bmatrix} A_i & 0_{n \times \hat{n}} \\ 0_{\hat{n} \times n} & 0_{\hat{n} \times \hat{n}} \end{bmatrix}}_{\hat{A}_i} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0_{n \times \hat{n}} & B_i \\ I_{\hat{n}} & 0_{\hat{n} \times p} \end{bmatrix}}_{\hat{B}_i} \underbrace{\begin{bmatrix} A_{ki} & B_{ki} \\ C_{ki} & 0_{p \times q} \end{bmatrix}}_{G_{Ci}} \underbrace{\begin{bmatrix} 0_{\hat{n} \times n} & I_{\hat{n}} \\ C_i & 0_{q \times \hat{n}} \end{bmatrix}}_{\hat{C}_i} \quad (7)$$

با جایگزینی (7) به (5) این مشکل معادل وجود معادل است:

$$\tilde{P}_i > 0,$$

$$F(G_{Ci}, \tilde{P}_i) = (\hat{A}_i + \hat{B}_i G_{Ci} \hat{C}_i) \tilde{P}_i + \tilde{P}_i (\hat{A}_i + \hat{B}_i G_{Ci} \hat{C}_i)^T < 0 \quad (8)$$

$F$ : یک متغیر ماتریس به عنوان تابع  $GC$  و  $n \times n$  بیان می شود

: مجموعه ای از ماتریس های متقارن  $n \times n$

یادداشت 1: Ck، Ak، Bk ماتریس کامل ساختار محاسبه شده با استفاده از LMI است که در [13] گزارش شده است. با این حال، از آنجا که هدف در اینجا قرار دادن ساختار بلوک مورب در این ماتریس است، این امر منجر به مشکل با نامساوی ماتریس BMI(Bilinear) می شود.

نکته 2: پیچیدگی محاسباتی برای حل مشکلات BMI بسیار بیشتر از مشکلات LMI است، زیرا آنها غیرقابل نفوذ هستند و می توانند راه حل های متعددی داشته باشند.

لازم به ذکر است که BMI در (8) می تواند به عنوان یک LMI دو برابر شود. برای حل این مشکل BMI، در هر مرحله، گروه های متغیر در تکرار ثابت می شوند تا BMI را به LMI کاهش دهند. به عبارت دیگر، محدودیت های

$G_C$  or  $\tilde{P}$  BMI در (8) را می توان به صورت مجموعه ای از محدودیت های LMI به راحتی با نگه داشتن یا ثابت، به طوری که فقط یک متغیر باید در یک زمان حل شود. حتی اگر شاخص توده بدنی اصلی امکان پذیر باشد،

LMI های القا شده ممکن است غیر قابل قبول باشند اگر  $G_D$  or  $\tilde{P}$  نامناسب تنظیم شوند. سپس با اتخاذ ایده روش هماتوپی، تبدیل به LMI ها می تواند بسیار موثر باشد. یک عدد حقیقی  $\lambda$  را که به تدریج از  $0 \rightarrow 1$  تغییر

می کند را بررسی کنید و یک مسیر هماتوپی را برای اتصال  $H(G_{Di}, \tilde{P}_i, \lambda_i)$  از کنترل کامل (GC) به

کنترل کننده بلوک مورب (GD) به طوری که:

$$H(G_{Di}, \tilde{P}_i, \lambda_i) = F((1 - \lambda_i) G_{Ci} + \lambda_i G_{Di}, \tilde{P}_i) \quad (9)$$

جایی که متغیر ماتریس H یک تابع از GD، P و  $\lambda$  است. را در (9) بیان کنید، با  $\lambda = 0$ ، نتیجه یک کنترل کامل ساختار GC (یعنی مرحله اولیه محاسبات) و هنگامی که  $\lambda = 1$ ، آن را به یک ساختار غیر متمرکز GD منعکس کننده مرحله نهایی مورد نظر به طور ریاضی، این معادل است:

$$H(G_{Di}, \tilde{P}_i, \lambda_i) = \begin{cases} F(G_{Ci}, \tilde{P}_i), \lambda = 0 \\ F(G_{Di}, \tilde{P}_i), \lambda = 1 \end{cases} \quad (10)$$

راه حل نهفته در خانواده مشکلات است:

$$H(G_{Di}, \tilde{P}_i, \lambda_i) < 0, \lambda_i \in [0, 1] \quad (11)$$

برای انجام روش هوموتوپی، یک راه حل برای  $(G_D, \bar{P})$  را در  $\lambda = 0$  پیدا کنید. در این نقطه، ما مجموعه  $0 = \lambda$  را از  $GD$  به نظر نمی‌رسد در (11) و تنظیم  $0 = GD$ . اگر افزایش در  $\lambda$  نگه داشته می‌شود به اندازه کافی کوچک (نگاه کنید به  $\lambda k$  در الگوریتم)، انتخاب  $0 = GD$  بر هماتوپیپی در همگرایی نشان داده می‌شود

الگوریتم محاسباتی برای رسیدن به یک ساختار بلوک موربانه از یک کنترل کامل سازه در زیر شرح داده شده است.

نکته 3: میزان همگرایی الگوریتم برای موفقیت در رسیدن به یک راه حل مطلوب (GD) بستگی به انتخاب  $GC$  دارد که منحصر به فرد نیست و نقطه شروع مسیر هوموتوپی که توسط (9) تعریف می‌شود را تعریف می‌کند.

نویسنده‌گان نشان می‌دهد که جستجوی تصادفی در یک مجموعه پارامتریک از کنترل کننده‌های  $H^\infty$  مفید است برای پیدا کردن یک کنترل کننده  $H^\infty$  متمرکز مناسب که برای آن الگوریتم همگرا است. توجه داشته باشد که عدم همگرایی الگوریتم برای یک  $GC$  خاص، به این معنی نیست که یک مشکل کنترل غیرمتتمرکز دارای هیچ راه حل نیست.

نکته 4: برای بهبود همگرایی الگوریتم، توصیه شده است که دو  $LMI$  را که توسط ثابت کردن یکی از دو متغیر در بدست آمده، حل کنیم. لازم نیست مقابله با دوم را بپذیریم، اما به نظر می‌رسد که همگرائی را بهبود بخشد.

نکته 5: به عنوان راه حل برای (11) منحصر به فرد نیست، ما می‌توانیم راه حل (10)  $BMI$  را در صورت شروع به الگوریتم شروع کنیم و از  $0 = \lambda$  شروع کنیم و مسیر هوموتوپی جایگزین بدست آمده با تعداد کمتری از هماتوپی مراحل  $M$  بین (0، 1).

همگام سازی طراحی برای قابلیت اطمینان: برای جمع آوری مجموعه‌های واقع گرایانه از مشخصات طراحی کنترل برای شبکه‌های برق، ما پیشنهاد می‌کنیم فرمول بالا را برای تامین ثبات با تغییر شرایط عملیاتی پیشنهاد.

شرایط کار سیستم قدرت اغلب تغییر می‌کند. از این رو، خطی سازی سیستم قدرت برای تعدادی از شرایط عملیاتی (به عنوان مثال،  $L$ ) اجازه می‌دهد تا برای طراحی کنترل کننده‌هایی که توانایی در طیف وسیعی از شرایط عملیاتی را فراهم می‌کنند. الگوریتم پیشنهاد شده در بخش قبلی، تبدیل یک کنترل کننده تک متمرکز بر اساس یک حالت

عملیاتی خاص را به یک کنترل کننده غیر متمرکز طراحی می کند. یک تعمیم برای شرایط عملیاتی 1 می تواند در نظر گرفته شود که منجر به یک کنترلر غیر متمرکز شده با توجه به  $i = 1, 2 \dots l$  برای معادلات (7) - (9) می شود.

برای نشان دادن این، بگذارید دو کنترل متمرکز GC 1 و GC 2 را که بر مبنای مدل‌های سیستم قدرت  $(A_1, B_1, C_1, 0)$  و  $(A_2, B_2, C_2, 0)$  طراحی شده، در نظر بگیریم. از طریق دو مسیر مختلف هموتوپی،  $H(G_{D2}, \bar{P}_2, \lambda_2)$  و  $H(G_{D1}, \bar{P}_1, \lambda_1)$  و  $GD1$  و  $GD2$  به طور جداگانه رسیده است. با اضافه کردن محدودیت معادله  $GD1 = GD2$ ، یک کنترلر غیر متمرکز قادر به تثبیت دو شرایط عملیاتی می شود.

یک تعمیم برای اطمینان از این که یک کنترلر غیر متمرکز،  $GD$  که ثبات شرایط کار را تثبیت می کند، می تواند با تعریف تعاریف سیستم های زیر برای معادلات (8) - (9) مشخص شود و به صورت قبلی عمل شود.

$$F(\mathcal{G}_C, \mathcal{P}) = (\mathcal{A} + \mathcal{B}\mathcal{G}_C\mathcal{C})\mathcal{P} + \mathcal{P}(\mathcal{A} + \mathcal{B}\mathcal{G}_C\mathcal{C})^T \quad (12)$$

$$H(\mathcal{G}_C, \mathcal{P}, \Lambda) = F((1 - \Lambda)\mathcal{G}_C + \Lambda\mathcal{G}_D, \mathcal{P}) \quad (13)$$

که

$$\left[ \begin{array}{c|c} \mathcal{A} & \mathcal{B} \\ \hline \mathcal{C} & 0 \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{ccc|ccc} \hat{A}_1 & 0 & . & 0 & \hat{B}_1 & 0 & . & 0 \\ 0 & \hat{A}_2 & . & 0 & 0 & \hat{B}_2 & . & 0 \\ . & . & . & . & . & . & . & . \\ 0 & 0 & . & \hat{A}_l & 0 & 0 & . & \hat{B}_l \\ \hline \hat{C}_1 & 0 & . & 0 & 0 & 0 & . & 0 \\ 0 & \hat{C}_2 & . & 0 & 0 & 0 & . & 0 \\ . & . & . & . & . & . & . & . \\ 0 & 0 & . & \hat{C}_l & 0 & 0 & . & 0 \end{array} \right]$$

$$\hat{A}_i \in \Re^{n_l \times n_l}, \hat{B}_i \in \Re^{n_l \times 1}, \hat{C}_i \in \Re^{1 \times n_l}, i = 1, 2, \dots, l$$

$$\mathcal{P} = diag(\tilde{P}_1, \tilde{P}_2, \dots, \tilde{P}_l); \Lambda = diag(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_l)$$

$$\mathcal{G}_C = [G_{C_1} G_{C_2} \cdots G_{C_l}]^T; \mathcal{G}_D = [G_{D_1} G_{D_2} \cdots G_{D_l}]^T$$

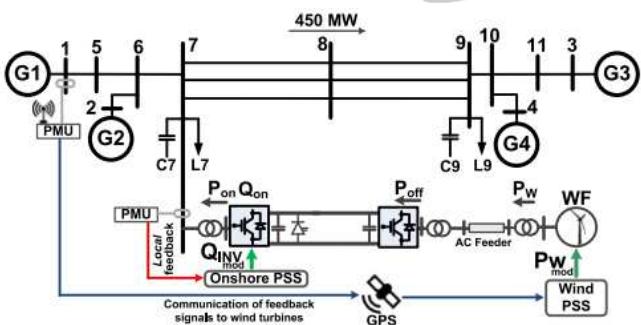
دلیل انتخاب روش هماتوپویی بر روشهای معمول تکرار آن است که مشاهده شد که دامنه جذب یک نقطه راه حل برای روش های تکرار معمولاً بسیار کوچکتر از روش های هماتوپویی است. با این حال، با توجه به ماهیت الگوریتم،

عدم همگرایی به این معنا نیست که یک راه حل برای مشکل BMI وجود ندارد. کاهش مدل می تواند برای کاهش بار محاسباتی و از این رو زمان همگرایی را بهبود بخشد.

#### 4. ماشین، سیستم 2 منطقه I

برای مطالعه موردی اول، شناخته شده 4 دستگاه، 2 منطقه آزمون سیستم به عنوان شبکه در ساحل در نظر گرفته شده است. پارامترهای مورد استفاده را می توان یافت.

یک WF ساحلی به صورت شعاعی به باس 7 از طریق پیوند VSC-HVDC دوقطبی  $\pm 150$  کیلوولتال متصل می شود، همانطور که در شکل 6 نشان داده شده است. WF شامل 100 ژنراتور توربین بادی (WTG) با امتیاز 2 مگاوات، 0.69 کیلوولت است. مدل WTG جمع شده برای نشان دادن WF در این مطالعه مورد استفاده قرار می گیرد. در بار کامل، نیروگاه بادی 200 مگاوات را از طریق یک فیدر AC 33 کیلو ولت به طرف DC انتقال می دهد. فراهم آوردن ظرفیت سربار (بار اضافی کوتاه مدت) 10% (10 مگاوات) قدرت توربین رتبه مشخص شده است. طول مدت توربین های بادی بیش از چند ثانیه است [12].



شکل 6. ماشین 4 - دستگاه، سیستم 2 - منطقه آزمون با WF دریایی متصل به باس 7 از طریق لینک - VSC-HVDC. حلقه های کنترل ثانویه با سیگنال های بازخورد PMU.

#### الف) خطی سازی مدل ها از طریق شناسایی سیستم

روشهای شناسایی سیستم مبتنی بر اندازه گیری مانند شناسایی سیستم فضای حالت فضایی عددی (N4SID) [23] میتوانند مدل های سیستمهای قدرت با چندین دستگاه قابل کنترل را با دقت تخمین بزنند (حالت A، B، C، D) (یعنی HVDC ، مزارع باد). سپس مدل های خطی شده می توانند برای طراحی کنترل کننده ها برای بهبود

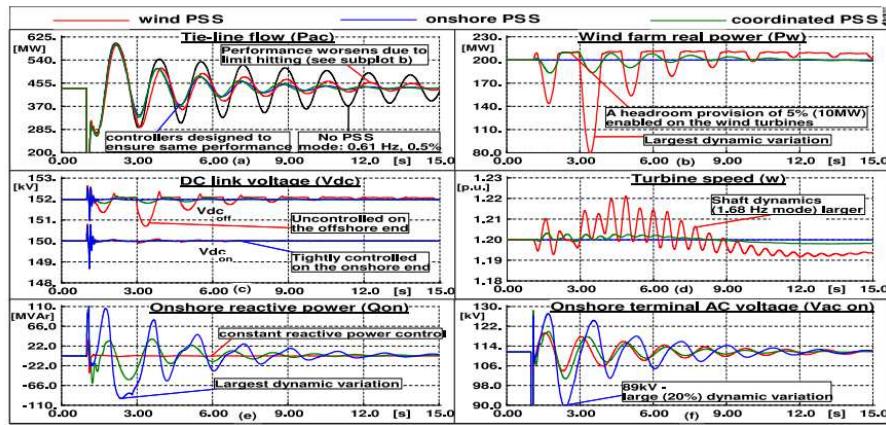
پایداری دینامیکی سیستم استفاده شوند. روش شناسی که در اینجا برای به دست آوردن مدل های خطی حالت فضایی به کار برد می شود، کوتاه است، زیرا فرمول آن در [24]، [26] یافت می شود.

مدل 25 ساله خطی حالت فضایی سیستم شامل DC-link و WF با استفاده از عمل مشابه از [24]، [26] بدست آمد. در بار کامل (سرعت باد اسمی)، تجزیه و تحلیل سیگنال های کوچک نشان داد که حالت های بین محدوده ای به آرامی خنثی شده،  $f = 2.2$  Hz،  $f = 0.61$  Hz و  $f = 1.06$  Hz با فرکانس  $f = 1.09$  Hz. یک حالت شفت توربین بادی در  $f = 1.68$  Hz هرتز با نسبت سدسازی  $3.9\%$  نیز مشاهده شده است.

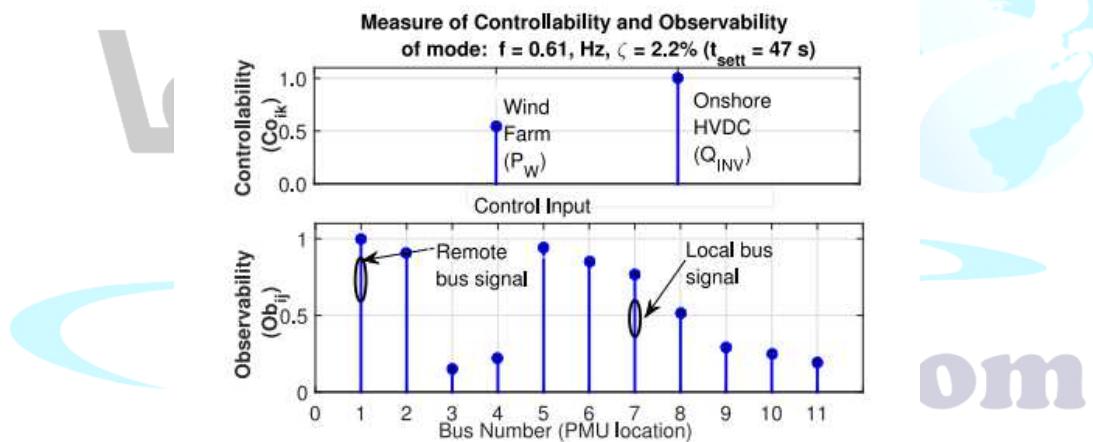
### ب) کنترل و تحلیل قابل مشاهده

برای تعیین سیگنال های ورودی پاسخگو (سیگنال ثبات دهی) از 11 سیگنال باند نامزدی به حالت بین منطقه، از روش های مشاهده قابل استفاده شد. [19] تمام باس ها به عنوان سایت های بالقوه برای بازخورد PMU در نظر گرفته شدند، به طوری که داده های اندازه گیری زاویه فاز بهنگام در سایت PSS در دسترس بود. اثربخشی ورودی کنترل WF و ساحلی HVDC به حالت منطقه ای از طریق اندازه گیری های کنترل، با توجه به شکل 8 نشان داده شده است.

برای این سیستم یکپارچه، سیگنال بازخورد محلی در باس 7 برای VSC ساحلی انتخاب شده است (اگرچه دارای اندازه گیری های سنجش کمتر از راه دور (یعنی باس 1)، اما این نیاز به ارتباط را از بین می برد. با این وجود، باد نیاز به برقراری ارتباط از راه دور سیگنال بازخورد و باس 1 براساس بالاترین میزان مشاهده شده انتخاب شده است، همانطور که در شکل 6 نشان داده شده است. برای تنظیم در اینجا در نظر گرفته شده، کنترل پذیری نسبی در ساحل تقریباً دو برابر مؤثر است. این اقدامات با مکانیزم محرک، حالت سیستم و غیره متفاوت خواهد بود و ملاحظات مهم قبل از طراحی کنترل است.



شکل 7. رفتار دینامیکی سیستم در پاسخ به یک گسل سه فاز خود پاکسازی برای 5 سیکل در باس شماره 9 بدون کنترل مهار نوسان قدرت (ردیابی سیاه و سفید) و با PSS (i) در فصلی (آثار آبی)، (ii) باد (ردیابی قرمز)، (iii) هماهنگ شده (ردیابی سبز). متغیرهای شکل گرفته در بالای هر subplot مشخص می شوند.



شکل 8: شاخص های قابل کنترل و قابل مشاهده (نرمالیزه شده) برای حالت تک منطقه ای. شاخص های مشاهده شده نشان می دهد که زاویه فاز ولتاژ باس در تمام 11 باس اندازه گیری شده است.

### ج) طراحی PSS

زیر بخش های زیر طرح طراحی PSS را برای VSC (a) در ساحل، (b) مزرعه باد در فضای سرپوشیده، و (c) هماهنگی بین مزرعه باد افزودن و VSC در ساحل. اهداف کنترل کننده برای ثبیت حالت تقریبا خیلی خنک است. هر سه طرح کنترل برای ثبیت حالت بین منطقه در مدت 12 ثانیه در نظر گرفته شده است، همانطور که در جدول 1 نشان داده شده است.

1) SISO کنترل طراحی (گزینه های I، II): PSS Wind و ساحلی PSS می توانند با استفاده از روش مکان یابی منطقه ای معرفی شده در بخش IV-A طراحی شوند (یعنی اولین مرحله برای ایجاد یک کنترل کننده SISO متمرکز). در تمام موارد، مدل کارخانه با استفاده از تکنیک توزیع متعادل به مدل 13 درجه کاهش یافت. [23، 27]. هر دو کنترل کننده به ترتیب به 8 مرتبه کاهش یافته و در عین حال حفظ دقت در محدوده فرکانس مورد علاقه. پارامترهای کنترل PSS برای PSS باد در شکل 9 نشان داده شده است.

Onshore PSS		WF PSS		Coordinated PSS		Mode
<i>t</i> , sec	<i>f</i> , Hz	<i>t</i> , sec	<i>f</i> , Hz	<i>t</i> , sec	<i>f</i> , Hz	Type
10.6	<b>0.605</b>	<b>10.1</b>	<b>0.611</b>	<b>9.7</b>	<b>0.612</b>	Inter-area
8.5	1.064	8.5	1.064	8.5	1.064	Local
8.2	1.097	8.2	1.097	8.1	1.095	Local

جدول I: تنظیم زمان و فراوانی حالت سیستم بین منطقه با سه کلید کنترل

شکل 9 پارامترهای PSS باد (مدوالاسیون قدرت فعل با استفاده از زاویه فاز ولتاژ از راه دور 1 به عنوان سیگنال

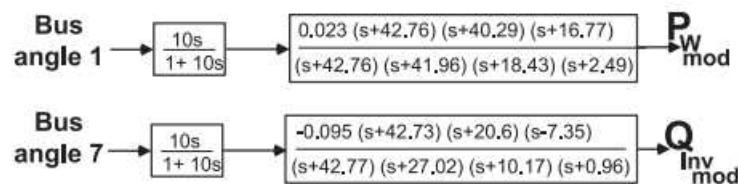
2) MIMO (Option III): به عنوان PSS هماهنگ شده دارای دو حلقه کنترل است، طراحی دو مرحله‌ای که در بخش IV پیشنهاد شده است در اینجا استفاده شده است. در مرحله اول، یک کنترل کننده هماهنگ و در عین حال متمرکز به طور همگام برای هر دو مزرعه باد و ایستگاه VSC در سرتاسر طراحی شده است که منجر به کنترل کامل MIMO از مرتبه 13 می شود. در مرحله طراحی دوم، روش هوموتوبی پیشنهاد شده به منظور بلوک غوطه وری (کنترل غیرمستقیم) کنترل کامل ساختار، که عمدتاً به دو کنترلر متمرکز تبدیل می شود که به صورت جسمی در سایت های محرک مربوطه آنها قرار می گیرد، همانطور که در شکل 6 نشان داده شده است، اعمال می شود. کنترل کننده نهایی پس از کاهش بیشتر با استفاده از تکنیک توزیع متعادل از ترتیب 8 است. کنترل کننده سنتز

(بازخورد)

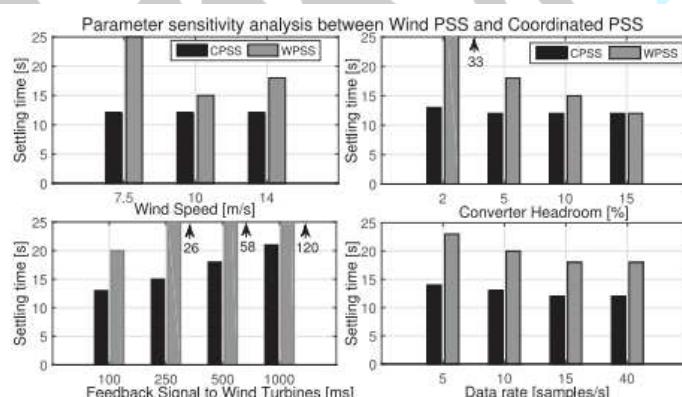
TarjomeFa.Com

یک کنترل کننده غیر متمرکز و با هماهنگ کنترل  $SISO \times 2$  است که هر کanal خروجی ورودی-خروجی از 4 مرتبه است، همانطور که در شکل 10 نشان داده شده است.

سطح تضعیف  $H\infty$  در کنترل کننده متمرکز بدست آمده ۱،۴۱۷ است، در حالی که سطح تضعیف ناشی از کنترل کننده غیر متمرکز ۱.۴۴۶ است. ما دریافتیم که هنگام استفاده از جعبه ابزار MATLAB الگوریتم هوموتوپی همگام با  $M = 64$  می آید.



شکل 10 پارامترهای PSS هماهنگ (مدولاسیون نیروی فعال مزرعه باد و توان راکتیو مبدل VSC در ساحل با استفاده از زاویه های فاز ولتاژ در باس های ۱ و ۷ به عنوان سیگنال بازخورد).



شکل 11: تاثیر سرعت های مختلف i) سرعت باد؛ ii) مبدل های مبدل WF؛ iii) CPSS و WPSS؛ iv) تأخیر در ارتباط سیگنال با محرك های توربین بادی؛ v) نرخ داده کanal در زمان استقرار حالت بین منطقه با توجه به سیستم حلقه بسته با کنترل غیر متمرکز به طور منطقی با کنترل کننده متمرکز شبیه بود.

#### د) نتایج شبیه سازی

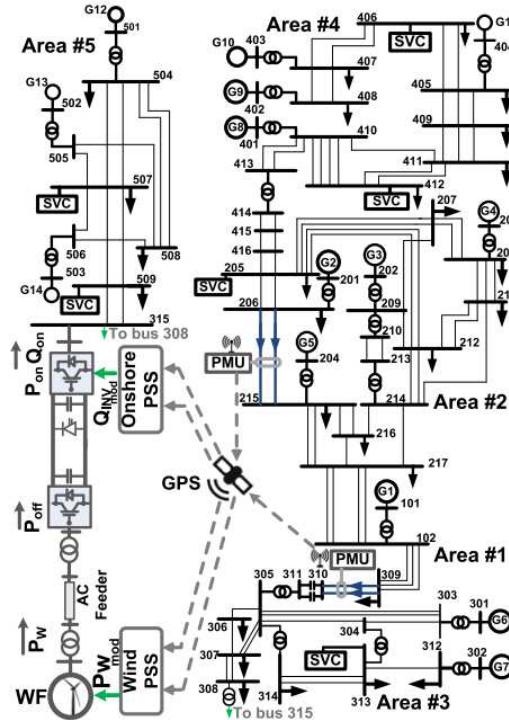
شبیه سازی دینامیکی در کارخانه نیروی برق DIgSILENT به منظور مقایسه عملکرد سیستم با سه گزینه PSS انجام شده است، همانطور که در شکل 7 نشان داده شده است. یک گسل Self-clearing سه فاز در بس 9 برای 5 سیکل به عنوان اختلال در نظر گرفته شد.

بدون PSS ، پاسخ سیستم، همانطور که از جریان جریان تیلین در شکل 7 (a) مشاهده می شود بسیار نوسانی (ردیابی سیاه و سفید) است، در حالی که با هر یک از سه PSS ، نوسان در 12 ثانیه حل و فصل می شود. اگر چه پاسخ سیستم به نظر می رسد مشابه است، تغییرات در قدرت خروجی WF و ولتاژ DC لینک متفاوت است. به عنوان مثال، خروجی واقعی قدرت مزرعه باد، نشان داده شده در شکل 7(b)، کمتر با PSS هماهنگ شده کمتر از PSS باد است. در حقیقت، با باد PSS ، قدرت خروجی مزرعه باد در 210 مگاوات کاهش می یابد (که به میزان 5٪ با قدرت نامی 200 مگاوات می رسد)، که منجر به پایین آمدن سیستم می شود - ردیابی قرمز در شکل 7 . (a) از نتایج، می توان مشاهدات زیر را انجام داد:

1) ساحلی: PSS منجر به تغییر غیر قابل قبول ولتاژ در دره و تغییرات پویای بزرگ در توان راکتیو در ساحل می شود.

2) PSS Wind: نتایج به دست آوردن محدودیت های مکرر، تغییرات نسبتاً بزرگ و سریع در سرعت توربین (که تاثیر عمر توربین)، و همچنین ولتاژ DC در دریایی است. مدولاسیون قدرت واقعی WF در ارتباط با پویایی تیرهای (شفت حالت) توربین های باد دیده می شود.

3) هماهنگ شده: سازش دو مورد فوق است که در آن میزان تغییرات پویای تمام متغیرهای فوق کمتر از PSS و PSS در خلیج فارس است؛ به این ترتیب وظیفه کنترل کلی بین مزرعه بادی و مبدل ساحل به اشتراک گذاشته می شود.



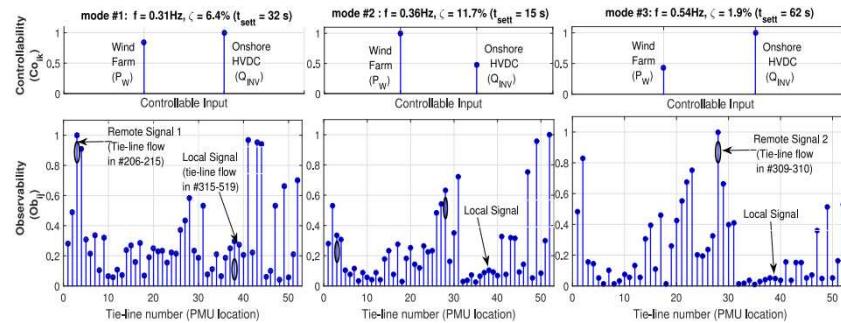
شکل 12: 14 دستگاه، سیستم آزمون 5 منطقه ای با WF دریایی متصل به باس 1315 از طریق پیوند-VSC-HVDC کنترل کننده های PSS با سیگنال PMU نشان داده می شوند.

جدول 2: تنظیم زمان و فراوانی مناطق بین الملل و مکان های محلی سیستم 5 منطقه ای بدون کنترل ( / ) PSS

Mode Type	Open-loop		Mode #
	t, sec	f, Hz	
Inter-area	<b>32.1</b>	<b>0.31</b>	1
	15.0	0.36	2
	<b>62.3</b>	<b>0.54</b>	3
	5.5	1.12	1
	5.1	1.19	2
	4.1	1.22	3
	4.5	1.23	4
	4.1	1.24	5
	5.6	1.29	6
	4.1	1.31	7
Local	6.4	1.32	8
	5.7	1.40	9
	4.2	1.54	10

ه) تجزیه و تحلیل حساسیت پارامتریک

تجزیه و تحلیل حساسیت به منظور تعیین تأثیر تغییر شرایط سیستم یا پارامترها در زمان استقرار در هنگام استقرار PSS های باد و هماهنگ انجام شد.



شکل 13: شاخص های قابل کنترل و قابل مشاهده (برای هر یک از سه حالت بین منطقه ای) نرمال شده است.  
نمودار فوق نشان می دهد که حالت خاصی از کنترل ورودی های کنترل کننده (یعنی مزرعه بادی و OnVision HVDC) کنترل می شود. نمودار زیر نشان می دهد سطح مشاهده قابل مشاهده در یک حالت خاص در هر یک از 52 خطوط مربوط مربوط است.

نتایج به صورت خلاصه، همانطور که در شکل 11 نشان داده شده است، برای (i) سرعت باد مختلف، WV (ii) آمبول های فرکانس (بیش از حد رتبه بندی)، (iii) تأخیر در انتقال سیگنال به توربین های بادی فردی، و (iv) نرخ داده ها. مشخص شده است که PSS هماهنگ برای شرایط و پارامترهای سیستم نسبتاً قوی است؛ در حالی که عملکرد با Wind PSS بدتر می شود. وضعیت که در آن سیگنال بازخورد 1000 میلی ثانیه طول می کشد تا در توربین های بادی فرد منعکس شود، زمان استقرار با PSS هماهنگ کاهش می یابد به حدود 20 ثانیه، همانطور که در شکل 11 (c) دیده می شود.

## VI. مطالعه مورد II: 14 ماشین، سیستم 5 منطقه

روش پیشنهادی بر روی یک شبکه پیچیده تر، نشان دهنده سیستم برق جنوب شرقی استرالیا، همانطور که در شکل 12 نشان داده شده، تایید شد.

این سیستم به عنوان یک سیستم معیار IEEE برای تجزیه و تحلیل سیگنال های کوچک و طراحی PSS ها به کار گرفته شده است. پارامترهای شبکه از جمله پویایی (سیستم تحریک، PSS، و غیره) را می توان در [29] پیدا کرد.

سیستم معیار با WF ساحلی تقویت شده از طریق لینک DC به بس 315 متصل شده است، همانطور که در شکل 12 نشان داده شده است. شامل DFIG 225 WF است که برای تامین 450 مگاوات در سرعت باد اسمی جمع شده است. رتبه بندی مبدل برای مطابقت با عرضه دریابی انتخاب شده است.

### الف) خطی سازی مدل ها از طریق شناسایی سیستم

مجموعه ای از شرایط عملیاتی براساس تغییرات توپولوژیکی (مثلا خاموش شدن خطوط انتقال) مورد بررسی قرار گرفت. قطع تنها یک خط انتقال بحرانی در یک زمان انجام شد و سیستم پس از آن خطیر شد. بنابراین، مجموعه ای از مدل های حالت های حالت خطی تحت عمل مشابهی که در مورد پرونده قبلی مورد استفاده قرار می گیرد، به دست می آید. در این مقاله ما در نظر گرفته شده (i مورد اسمی، (ii تخلیه برنامه ریزی مدار 312 - 313 (مدار بحرانی با جریان بسیار زیاد).

در مورد اسمی، تجزیه و تحلیل سیگنال های کوچک نشان داد که دو ناحیه حالت ناحیه ای به آرامی خنثی شده اند، حالت سوم منطقه با حالت  $f = 0.36$  هرتز نیز وجود دارد، اما منطقی در  $11.7\%$  خنثی می شود. همچنین 10 حالت محلی وجود دارد که از طریق PSS ژنراتورها ثبت شده است، همانطور که در جدول 2 نشان داده شده است. حالت توربین توربین بادی در  $f = 1.74$  هرتز با نسبت سدسازی  $3.6\%$  نیز مشاهده شده است. تجزیه و تحلیل فاکتور مشارکت نشان می دهد که حالت  $0.54$  هرتز در نتیجه دستگاه هایی است که در ناحیه # 2 شبیه به آن ها در ناحیه 3 هستند، در حالی که حالت  $0.31$  هرتز از ماشین هایی در ناحیه # 4 بر روی آن ها در مناطق # 2 و # 3 نوسان می کند.

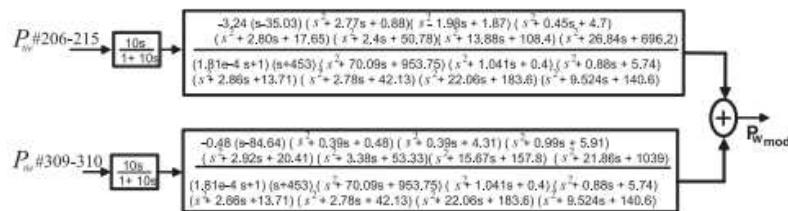
### ب) کنترل و تحلیل قابل مشاهده

دو ورودی تحریک کننده، QINV و PW، و جریان برق در سراسر 52 خطوط کیندلی به عنوان سیگنال خروجی نامزد مورد توجه قرار گرفتند. به عبارت دیگر، مدل سیستم حلقه باز 2 ورودی دارد - 52 خروجی. نتایج تحلیل تحلیلی / قابلیت مشاهده، نشان داده شده در شکل 13، برای ارزیابی سیگنال های ورودی مناسب (سیگنال ثبت شده) برای VSC و WF در ساحل برای به دست آوردن مؤثر برای هر سه حالت بین منطقه مورد استفاده قرار

گرفت. بر این اساس، خطوط کراس خط در 215-206 و 309-310 به عنوان سیگنال های بازخورد مناسب (انتخاب شده برای تمام طرح های PSS) انتخاب شدند، به عنوان زیر نمودار پایین نشان داده شده است. جالب توجه است، حالت # 1، # 3 بیشتر از VSC ساحلی قابل کنترل است؛ در حالی که # 2 از WF Mode # بیشتر کنترل می شود، همانطور که از نمودار بالا دیده می شود. بر خلاف سیستم آزمایشی در شکل 6 که در آن سیگنال محلی، ملاحظات مodal کافی برای PSS ساحلی را داشت؛ در این شبکه با 5 ناحیه جغرافیایی، در زیر شاخه های پایین تر در شکل 13 دیده می شود که سیگنال محلی منجر به مشاهده مodal ناکافی می شود و اگر انتخاب شود، نیاز به بارگذاری بیش از حد مبدل (سحر و جابجایی) کارایی بنابراین استفاده از سیگنال های راه دور تنها گزینه قابل قبول بود. نقاط ضعف استفاده از سیگنال های بازخورد از راه دور بعدها تحت خطرات بالقوه (مانند تأخیر، از دست دادن) در ارتباطات از راه دور این سیگنال ها نشان داده می شود. اثربخشی PSS به نوسانات نیروی جاذب بستگی دارد به چندین عامل مثلا توپولوژی سیستم، نوع بار و توزیع، موقعیت WF و HVDC با نقطه اتصال شبکه AC.

جدول 3: تنظیم زمان و فراوانی سیستم های حالت های بین منطقه با سه حلقه کنترل

Onshore PSS		WF PSS		Coordinated PSS		Inter-area
t, sec	f, Hz	t, sec	f, Hz	t, sec	f, Hz	Mode #
14.6	0.31	15.0	0.30	14.9	0.31	1
14.7	0.36	14.6	0.36	15.0	0.36	2
14.9	0.54	11.9	0.54	13.1	0.54	3



شكل 14 پارامترهای PSS باد (MISO) کنترل متumerکز.

Detailed block diagram of the MISO PSS controller:

- Inputs:  $P_{in} \# 206-215$  and  $P_{in} \# 309-310$ .
- Each input passes through a  $10s$  integrator.
- The outputs of the integrators are summed to produce  $P_{Wmod}$  and  $Q_{invmod}$ .
- Transfer functions (approximate forms):
  - For  $P_{in} \# 206-215$ :  $\frac{0.0027(s^2 + 46.94s + 550.83)(s^2 + 1.154s - 0.45)(s^2 + 13.21s + 77.79)}{(0.048s + 1)(s^2 + 47.17s + 556.2)(s^2 + 7.74s + 16.62)(s^2 + 5.78s + 130.1)}$
  - For  $P_{in} \# 309-310$ :  $\frac{0.0031(s^2 + 47.15s + 555.78)(s^2 + 18.2s - 56.02)(s^2 + 2.78s + 45.48)}{(0.015s + 1)(s^2 + 47.17s + 556.25)(s^2 + 21.22s + 27.79)(s^2 + 9.92s + 130.1)}$

شکل 15 پارامترهای PSS هماهنگ (کنترل کننده غیر متمرکز MIMO).

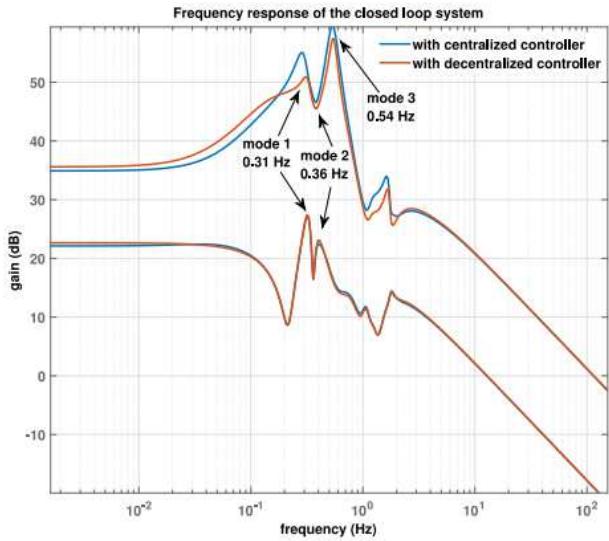
### ج) طراحی PSS

زیر بخش های زیر طرح طراحی PSS را برای VSC در ساحل، (a) مزرعه باد در فضای سرپوشیده، و (c) هماهنگی بین مزرعه باد افروزان و VSC در ساحل. این سه گزینه کنترل، همانطور که در بخش سوم توضیح داده شد، به طور جداگانه اجرا می شوند تا اطمینان حاصل شود که تمام حالت های نوسانی به 15 ثانیه برسد، همانطور که در جدول 3 نشان داده شده است.

1) طرح های کنترل کننده چندگانه (MISO): گزینه های I، II: PSS Wind و (Single-Output) گزینه های III-IV-الف تفاوت در اینجا این است که ساختار کنترل کننده با سیگنال ورودی ساحلی، با استفاده از رویکرد طراحی مشابه به عنوان موردی طراحی شده است. با استفاده از روش قطب بندی منطقه ای معرفی شده در بخش IV-الف تفاوت در اینجا این است که ساختار کنترل کننده با سیگنال ورودی چندگانه برای تهیه چند حالت انجام می شود.

کنترل کننده های سنتز شده (Wind PSS) و ساحلی (PSS) هر دو به ترتیب 30 هستند - همانند مدل کارخانه سیستم. کنترل کننده های نهایی پس از کاهش بیشتر، کنترل کننده های متمرکز چندگانه ورودی-خروجی (MISO) شانزدهم هستند. پارامترهای کنترل PSS برای PSS باد در شکل 14 نشان داده شده است.

2) طراحی کنترل کننده (MIMO): PSS گزینه III هماهنگ شده با استفاده از روش پیشنهاد شده در بخش 4 طراحی شده است. اول، یک کنترل کننده متمرکز MIMO - مشابه به اندازه مدل گیاه 30 - منظوره است که در نتیجه یک کنترل کننده کامل 2 - ورودی 2 - خروجی است. این مدل سپس به 14 مرتبه کاهش می یابد. سپس کنترل کننده با استفاده از الگوریتم مبتنی بر همولوگ با دو سیگنال از راه دور (با بیشترین میزان مشاهده مودال) به عنوان ورودی های کنترل تجزیه می شود. ساختار هر کanal PSS در شکل 15 نشان داده شده است یافته شد که الگوریتم هموتوپی همگرا زمانی که  $M = 256$ . پاسخ فرکانس حلقه بسته 30th نظم متمرکز در مقابل کنترل های غیر متمرکز مرتبه چهارم عملکرد مشابه (با وحامت عملکرد مورد انتظار به دلیل بلوك غوطه ور کردن ماتریس کامل ساختار) همانطور که در شکل 16 نشان داده شده است.



شکل ۱۶ پاسخ فرکانسی سیستم حلقه بسته با کنترل اصلی متمرکز و کاهش یافته غیر متمرکز.

#### د) نتایج شبیه سازی

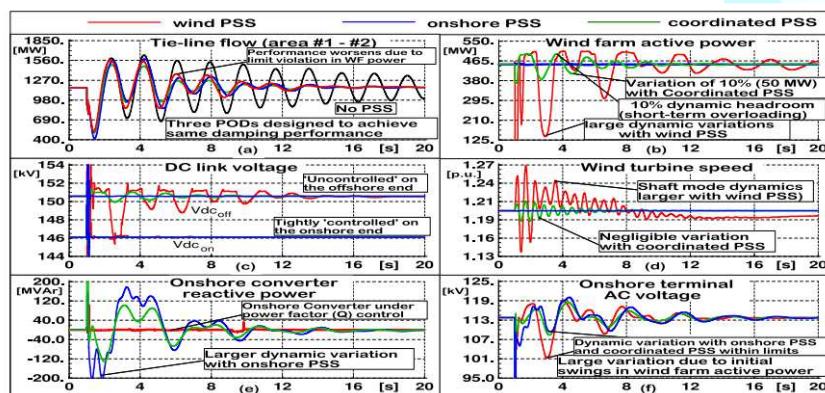
برای بررسی اثربخشی سه گزینه کنترل، مجموعه‌ای از اختلالات خطای معتبر در [17] DIGSILENT بر روی سیستم تست نشان داده شده در شکل ۱۲ انجام شد. یکی از شدیدترین اختلالات تحریک کننده نوسانات ناحیه ضعیف، بینابینی است خطای سه فاز در یکی از مدارهای انتقال کلیدی. برای گسل های موقتی، قطع کننده مدار اتوماتیک مجدد و عملیات عادی بازسازی می شود، در غیر این صورت، ممکن است یک یا دو خط برای تعمیر و نگهداری برداشته شود.

برای ارزیابی عملکرد کننده های طراحی شده، شبیه سازی های مربوط به سناریوهای خطا در نظر گرفته شده در مرحله طراحی (مورد پایه) و برای بررسی قابلیت اطمینان، شرایط گسل که در طراحی در نظر گرفته نشده اند، شامل قطع شدن مدار (مورد ۱) و گسل های نزدیک ایستگاه VSC ساحلی (مورد ۲) با توجه به هر سه گزینه کنترل PSS شبیه سازی شده است. در نهایت، رفتار پویا سیستم با سه گزینه کنترل PSS مورد بررسی قرار می گیرد زمانی که خطرات بالقوه در سیستم های ارتباطی از نظر تأخیر (مورد ۳) و از دست دادن سیگنال کامل (مورد ۴) در سیگنال های بازخورد راه دور رخ می دهد.

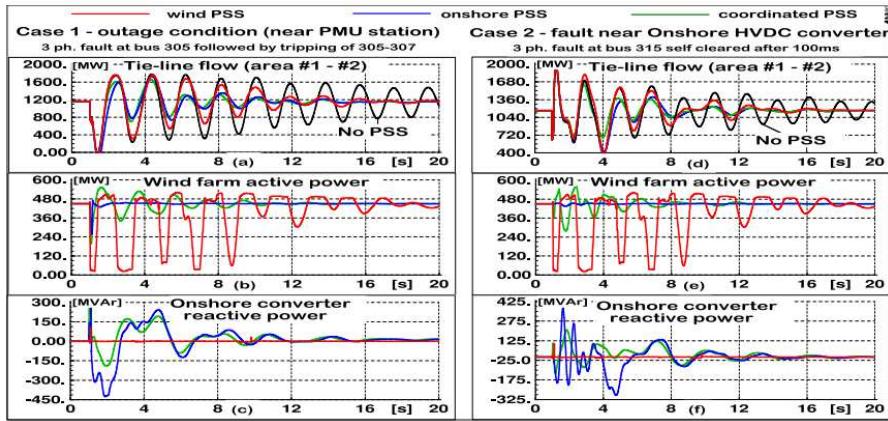
تأمین بخار 10٪ از قدرت توربین رتبه مشخص شده است. اختلالات زیر برای هر شبیه سازی با یک گسل جامد سه فاز برای 100 میلی ثانیه (5 سیکل) در نظر گرفته شده است:

- 1) مورد پایه: خطوط بین خطوط باس 313-312 و سپس بازپخش اتوماتیک قطع کننده مدار.
- 3) مورد 1: باس 305 پس از قطع یکی از خطوط بین باس 305-307.
- 3) ایستگاه مدار خود بسته شونده
- 4) مورد 3: تأثیر تأخیر در ارتباط سیگنال های راه دور با توربین های بادی و ایستگاه VSC ساحلی وضعیت گسل شبیه به مورد پایه است.

- 5) مورد 4: اثر از دادن سیگنال کامل در ارتباط سیگنال های راه دور با توربین های بادی و / یا ایستگاه VSC در ساحل. وضعیت گسل شبیه به مورد پایه است.



شکل 17. رفتار دینامیکی سیستم در پاسخ به گسل 3 فاز برای 5 سیکل در خط 313-312 و به دنبال آن خودکار مجدد مدار قطع کننده بدون کنترل PSS (ردیابی سیاه و سفید) و با (أساحلی PSS (ردیابی آبی)، PSS (ردیابی قرمز) و PSS (ردیابی سبز). متغیرهای شکل گرفته در بالای هر subplot مشخص می شوند.



شکل 18. رفتار دینامیکی سیستم در پاسخ به یک گسل 3 فاز در بس 305 برای 5 سیکل پس از قطع یکی از خطوط بین بس 305-307) نمودار (a) و پاسخ سیستم به 3 خطای فاز در بس 315 و پس از آن خودکار باز شدن سوئیچ مدار . (DF ) بدون کنترل) PSS ردیابی سیاه و سفید) و با (i ساحلی) PSS ردیابی آبی (ii) PSS ردیابی قرمز) و (iii) PSS هماهنگ (ردیابی سبز).

کنترل کننده های طراحی شده با هدف حل کردن چندین نوسانات در عرض 15 ثانیه (معیارهای عملکرد) به دنبال اختلالات است. علاوه بر این، باید هر یک از اختلالات فوق (قابلیت اطمینان) را به دنبال داشته باشد، هرچند که طراحی مبتنی بر شرایط عملیاتی پایه است (بدون وقفه). اختلالات در همه موارد 1 ثانیه پس از شروع شبیه سازی

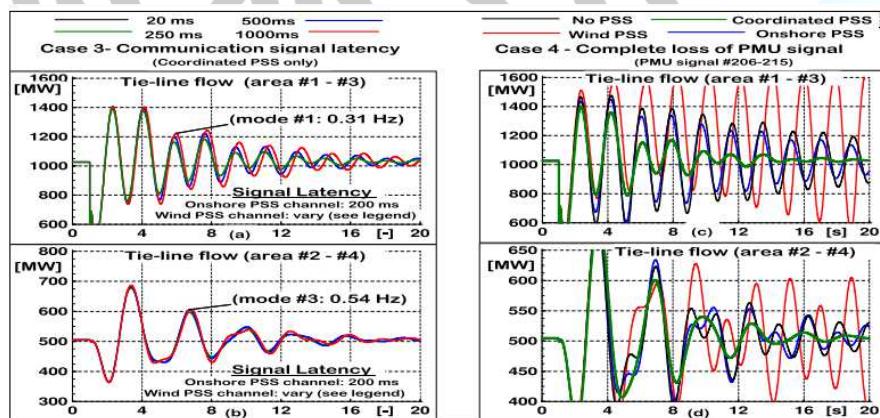
ایجاد شد. بخش بعدی مواردی را در رابطه با یافته ها بیان می کند:

1) مورد پایه: پاسخ دینامیکی سیستم پس از اختلال در شکل 17 نشان داده شده است. همانطور که در مطالعه مورد قبلی، تمام سه گزینه کنترل PSS قادر به خنک کردن حالت های چند منطقه ای در عرض 15 ثانیه می باشند . شبیه به مطالعه موردي قبلی، تغییرات پویایی بیشتر در قدرت واکنشی VSC در ساحل با PSS در فواصل زمانی منظم از PSS هماهنگ شده نیاز است . با این حال، تغییرات ناشی از ولتاژ AC در ساحل به دلیل کم بودن حساسیت Q-V در بس در ساحل مشابه است.

2) مورد 1 از شکل 18 (الف) مشاهده می شود که نوسانات بین محدوده در مدت زمان مورد نظر 15 ثانیه برای شرایط عملکرد پس از گسل که در طراحی های کنترل نشده در نظر گرفته نمی شوند و بنابراین مورد نیاز استحکام این یک وضعیت قطع بسیار شدید است زیرا مدار انتقال قدرت بالا را تحمل می کند. PSS باد نیاز به حدود 20

ثانیه برای خنثی کردن حالت های بین منطقه ای است که به علت بارگذاری بارهای پویا پویا است، همانطور که در شکل 18 (b) دیده می شود. همانطور که در شکل 18 (c) دیده می شود، تغییرات پویایی بزرگتر (نوسان) در توان (MVar 190 ± 420) از PSS MVAr Offshore (+ 240 / -420) هماهنگ VSC در ساحل با واکنشی لازم است.

(3) مورد 2: (یک خطا در بس 315 که در نزدیکی VSC ساحلی شبیه سازی شده است. نتایج بدست آمده در شکل (f) - (d) (نتیجه گیری های صورت گرفته در مورد 1 را ثابت می کند. 4) سیگنال پنهان: در مطالعه مورد قبلی در بخش VII، تنها سیگنال های موجود در دسترس برای کنترل بازخورد به دلیل مشاهدات خوب بین حالت منطقه در نظر گرفته شد. در مطالعه موردی، مزایای استفاده از سیگنال های راه دور (به نفع محلی) موجود در واحد اندازه گیری (PMU) در بخش VI-B توجیه می شود.

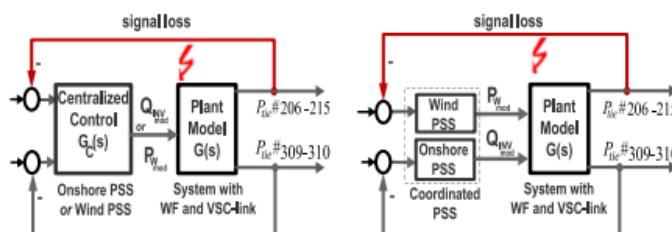


شکل 19 تأثیر تأخیر در برقراری ارتباط سیگنال های راه دور به توربین های بادی و ایستگاه VSC ساحلی در نمودار (b) - (a) نشان داده شده است (d) - (c). تأثیری بر سیستم پس از از دادن سیگنال 206-215 به تمام سه کنترل کننده PSS نشان می دهد. گسل 3 فاز برای 5 سیکل در خط کشی 312-313 و به دنبال آن خودکار مجدد مدار قطع کننده. توضیحات ردیابی که در بالا نشان داده شده است.

با این وجود، این هزینه‌ها در صورت بروز تاثیرات بالقوه زمانی رخ می‌دهد که مشکالت (مثلاً با تأخیر سیگنال، از دست دادن کامل سیگنال PMU در سیستم ارتباطی راه دور رخ می‌دهد. برای پرونده اسمی، تأخیر استاندارد 20 میلی ثانیه (مربوط به نمونه برداری 50 هرتز) برای هر دو کanal PSS هماهنگ مطرح شده است. برای بررسی تأثیر زمان تأخیر سیگنال، برای این مطالعه یک تأخیر ثابت 200 میلی ثانیه برای PSS ساحلی مورد بررسی قرار گرفتیم، در حالی که تأخیر به Wind PSS از 250 تا 1000 میلی ثانیه متغیر بود. همانطور که قبلاً نشان داده شد، تجزیه و تحلیل فاکتور مشارکت نشان داد که کدام گروه از ژنراتورها به حالت‌های ناحیه‌ای کوچک (0.31 و 0.54 هرتز) کمک کردند. حالت 0.31 هرتز در جریان خط کشی بین ناحیه‌های #1 - #3 ظاهر می‌شود، در حالی که حالت 0.54 هرتز در جریان بین مناطق #2 - #4 است.

شکل (a) و (b) تأثیر تأخیر سیگنال تا تأخیر 1000 میلی ثانیه در دو حالت بحرانی بین منطقه را نشان می‌دهد. این کمپرسور با توجه به تأخیر تا 1000 میلی ثانیه برای کanal باد PSS، دچار کمبود شد. البته، در مورد نادر که تأخیر به کanal PSS در ساحل (که در این مطالعه موردی نقش مهمی در خم کردن حالت) بیش از 200 میلی ثانیه است، پس پاسخ حلقه بسته قابل ملاحظه‌ای بدتر می‌شود. در چنین مواردی، تأخیر در مرحله طراحی به صراحت باید در نظر گرفته شود، اگر چه این جنبه در این مقاله مورد توجه قرار نگرفت.

Case 4 (Signal Loss): (5) یکی دیگر از جنبه‌های مهم، اثربخشی کنترل کننده‌ها در صورت عدم ارتباط ارتباط سیگنال است. مشکل این است که در اینجا این است که تاثیر بر روی سیستم حلقه بسته هنگام اتخاذ یک کنترل کننده متمرکز (i) کنترل کننده متمرکز (به عنوان مثال PSS در خلیج فارس و باد (ii) یک کنترل غیر متمرکز (به عنوان مثال PSS هماهنگ) هنگامی که یک سیگنال از دست دادن رخ می‌دهد، همانطور که در شکل 20 نشان داده شده است.



شکل 20. سیستم حلقه بسته با (a) ساختار کنترل متمرکز (چپ)، (b) ساختار کنترل غیرمتمرکز (راست). افت سیگنال بازخورد نشان داده شده در قرمز است.

شکل (c) و (d) نشان می دهد که اثر از دست دادن یک سیگنال بازخورد (206-215) (در زمان حل و فصل از این دو حالت درون منطقه به آرامی میرا 0.31 و 0.54 هرتز) طبق هر سه گزینه های کنترل در زیر PSS باد (اثرات قرمز) عملکرد حلقه بسته با توجه به مورد حلقه باز (ردیابی سیاه و سفید) بسیار بدتر به عنوان حالت بسیار نزدیک به محور خیالی تغییر کرده است. این به دلیل اتصال متقابل بین حلقه های کنترل از طریق شرایط خارج از قطر کنترل است. با PSS (اثرات آبی) اثر مشابهی را می توان مشاهده کرد، اما عملکرد خمسی به سمت پرونده باز حلقه تغییر می کند. با این حال، در صورت عدم تممرکز، توانایی خنک سازی حالت ها حفظ می شود. این به این دلیل است که ساختار کنترل بلوك مورب است و حلقه های کنترل فردی از یکدیگر جدا می شوند، که نه تنها ساده تر در معماری غیرمتمرکز اجرا می شود، بلکه یک سطح مشخصی از عملکرد را از طریق حلقه های کنترل سالم در صورت از دست دادن از یک یا چند (اما نه همه) سیگنال های بازخورد از راه دور. نتایج این بخش نتایج حاصل از شبکه آزمون قبلی را ثابت می کند؛ با این حال، در یک سیستم عملی تر با چند حالت مختلف منطقه.

## 7. نتیجه گیری

اثربخشی کنترل مبرد نیروی هماهنگ شده توسط مزارع دریایی دریایی و مبدل های VSC-HVDC در ساحل که این مزارع بادی را متصل می کند ارائه شد. برای این منظور، یک الگوریتم با استفاده از ایده روش هموتوپی مورد استفاده قرار گرفت که کنترل کننده را از یک کنترل متمرکز به یک کنترل کننده غیر متمرکز (بلوك مورب) تغییر شکل داد. عملکرد مکانیکی مشابهی می تواند با کمک مکانیکی تنها از VSC ساحلی یا مزرعه بادی ساحلی به دست آید. با این وجود، با استفاده از دو مطالعه موردی نشان داده شده است که کنترل مختلط از لحظه کاهش خروج از AC موجب کاهش غلظت ولتاژ در ایستگاه مبدل ساحلی می شود، در حالی که با توجه به ظرفیت بیش از حد HVDC و مبدل های توربین باد.

## REFERENCES

- [1] "Network code for HVDC connections and DC-connected power park modules," European Network of Transmission System Operators, 2014. [Online]. Available: <https://www.entsoe.eu/major-projects/network-code-development/high-voltage-direct-current/Pages/default.aspx>
- [2] J. L. Dominguez-Garcia, O. Gomis-Bellmunt, F. D. Bianchi, and A. Sumper, "Power oscillation damping supported by wind power: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 7, pp. 4994–5006, 2012.
- [3] F. M. Hughes, O. Anaya-Lara, N. Jenkins, and G. Strbac, "Control of DFIG-based wind generation for power network support," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 4, pp. 1958–1966, Nov. 2005.
- [4] J. Dominguez-Garcia, F. Bianchi, and O. Gomis-Bellmunt, "Analysis of the damping contribution of power system stabilizers driving wind power plants," *Wind Energy*, vol. 17, no. 2, pp. 267–278, 2014.
- [5] M. Zhixin, F. Lingling, D. Osborn, and S. Yuvarajan, "Control of DFIG-based wind generation to improve interarea oscillation damping," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, no. 2, pp. 415–422, Jun. 2009.
- [6] A. E. Leon and J. A. Solsona, "Power oscillation damping improvement by adding multiple wind farms to wide-area coordinating controls," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 3, pp. 1356–1364, May 2014.
- [7] M. Singh, A. J. Allen, E. Muljadi, V. Gevorgian, Y. Zhang, and S. Santoso, "Interarea oscillation damping controls for wind power plants," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 3, pp. 967–975, Jul. 2015.
- [8] Y. Liu, J. R. Gracia, T. J. King, and Y. Liu, "Frequency regulation and oscillation damping contributions of variable-speed wind generators in the U.S. Eastern Interconnection (EI)," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 3, pp. 951–958, Jul. 2015.
- [9] M. Mokhtari and F. Aminifar, "Toward wide-area oscillation control through doubly-fed induction generator wind farms," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 6, pp. 2985–2992, Nov. 2014.
- [10] Y. Wang, J. Meng, X. Zhang, and L. Xu, "Control of PMSG-based wind turbines for system inertial response and power oscillation damping," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 2, pp. 565–574, Apr. 2015.
- [11] L. Zeni *et al.*, "Power oscillation damping from VSC-HVDC connected offshore wind power plants," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 31, no. 2, pp. 829–838, Apr. 2016.
- [12] G. Turnowski, P. C. Kjaer, R. Laerke, F. Iov, R. Teodorescu, and A. Adamczyk, "Power plant and energy storage system for provision of grid ancillary services," WIPO Patent PCT/DK2013/050 032, Feb. 7, 2013.
- [13] R. Ramos, L. Alberto, and N. Bretas, "A new methodology for the coordinated design of robust decentralized power system damping controllers," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 1, pp. 444–454, Feb. 2004.
- [14] B. Chaudhuri and B. Pal, "Robust damping of multiple swing modes employing global stabilizing signals with a TCSC," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 1, pp. 499–506, Feb. 2004.
- [15] G. Zhai, M. Ikeda, and Y. Fujisaki, "Decentralized  $H_\infty$  controller design: A matrix inequality approach using a homotopy method," *Automatica*, vol. 37, no. 4, pp. 565–572, 2001.
- [16] M. A. Poller, "Doubly-fed induction machine models for stability assessment of wind farms," in *Proc. IEEE Power Tech Conf.*, Bologna, Italy, 2003, vol. 3, 6 pp., doi: 10.1109/PTC.2003.1304462.
- [17] "Digsilent powerfactory 15.2," 2015. [Online]. Available: <http://www.digsilent.de>
- [18] Ö. Göksu, J. N. Sakamuri, C. A. Rapp, P. Sørensen, and K. Sharifiabadi, *Cluster Control of Offshore Wind Power Plants Connected to a Common HVDC Station*, Energy Procedia, vol. 94, Sep. 2016, pp. 232–240, ISSN 1876-6102, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.230>
- [19] I. Kamwa, R. Grondin, and Y. Hebert, "Wide-area measurement based stabilizing control of large power systems-a decentralized/hierarchical approach," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, no. 1, pp. 136–153, Feb. 2001.
- [20] M. Chilali and P. Gahinet, " $H_\infty$  design with pole placement constraints: An LMI approach," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 41, no. 3, pp. 358–367, Mar. 1996.
- [21] J. C. Doyle, K. Glover, P. P. Khargonekar, and B. A. Francis, "State-space solutions to standard  $H_2$  and  $H_\infty$  control problems," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 34, no. 8, pp. 831–847, Aug. 1989.

