بهبود پایداری مبدل‌های توربین بادی در طول تزریق جریان به خطاهای شبکه‌ی ولتاژ پایین و آنالیز پایداری مبتنی بر فرکانس PLL

گلنوش قربانی[۱]، سعید رحمتی [۲]، مهدی کرمی [۳]، سیدمحسن سیدموسوی [۴]

۱-دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز g.rhorbani@iauahvaz.ac.ir

۲-دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز s.rahmati@iauahvaz.ac.ir

۳-دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز m.karami@iauahvaz.ac.ir

۴-دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز mmoosavi@khz.srbiau.ac.ir

چکیده: امروزه با تغییر قوانین و طبق مجموعه قوانین جدید شبکه، جهت یکپارچه‌سازی انرژی بادی، توربین‌های بادی در حین وقوع خطا حتی وقتی که ولتاژ شبکه به مقدار صفر کاهش می‌یابد، باید برای تزریق بخشی از جریان راکتیو(متناسب با افت ولتاژ) به شبکه متصل باقی بمانند. با این حال، یک واقعیت عملی در بهره‌برداری از مبدل‌های توربین بادی، یعنی ناپایداری مبدل‌های متصل به شبکه در طول تزریق جریان به خطاهای ولتاژ پایین (نزدیک به صفر) در بسیاری از مراجع نادیده گرفته شده است. در این مقاله، ناپایداری مبدل‌های سمت شبکه توربین‌های بادی، به صورت تلفات همزمان سازی (LOS) تعریف شده است و به دنبال یک رویکرد پایداری جدید بر اساس فرکانس و کنترل حلقه قفل فاز (PLL) می باشد تا با کنترل فاز و جریان راکتیو و اکتیو تزریقی توربین بادی در حین وقوع خطاهای شدید بتوان میزان نوسان را کاهش داد و در نتیجه باعث پایدار ماندن شبکه شد.

کلمات کلیدی: توربین بادی، پایداری، کنترل فاز، تلفات همزمان سازی (LOS)، حلقه قفل شونده فاز (PLL)

۱- مقدمه

یکی از مسائل مطرح در زمینه نیروگاه‌های بادی، پایداری آن‌ها در برابر نوسانات دینامیکی ولتاژ است. اتصال کوتاه و افت ولتاژ شدید و ناگهانی سبب می‌شود که نیروگاه‌های بادی ناپایدار شوند. بنابراین برای جلوگیری از ناپایداری شبکه و توربین‌های بادی از روش‌های مختلف جبران سازی استفاده می‌گردد، طبق مجموعه قوانین مشترک شبکه، نیروگاه‌های بادی به منظور پشتیبانی از ولتاژ شبکه و تزریق جریان راکتیو به شبکه، باید در حین وقوع خطاهای اتصال کوتاه شبکه، به شبکه متصل باشند[۱] و بر اساس مجموعه قوانین ENTSO-E [۲] که به عنوان یک چهارچوب مشترک برای تمام کشورهای اروپایی پیشنهاد شده است، در اثر اتصال کوتاه در شبکه فروریختگی ولتاژ در شینی که ژنراتور بادی به آن متصل است رخ می‌دهد و از میزان توان تحویلی ژنراتور به شبکه کاسته شده و توازن بین توان تولیدی و مصرفی به هم‌خورده و ژنراتور شروع به شتاب گرفتن می‌کند تا آنجا که ژنراتور ناپایدار شده و بایستی از مدار خارج گردد [۵-۳]. بدین ترتیب نارسایی فرورفتگی ولتاژ سبب افزایش جذب توان راکتیو مورد نیاز ژنراتور بادی شده و افزایش لغزش ژنراتور را در پی خواهد داشت که به ناپایداری و خارج شدن آن از شبکه منجر می‌گردد چنانچه شتاب گرفتن ژنراتور سریع تر از سرعت بازیابی کمبود ولتاژ باشد سرعت ژنراتور افزایش‌یافته و

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.1.2.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- spring & summer 2015
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]

بایستی از مدار خارج گردد. نحوه و زمان پاسخگویی توربین بادی با توجه به ساختار آن‌ها همواره مورد توجه بهره‌برداران شبکه بوده است. استفاده از روش کاهش توان مکانیکی ورودی در هنگام خطای اتصال کوتاه در شبکه و فرورفتگی ولتاژ، با تغییر زاویه پره‌ها، تنها در توربین‌هایی که این قابلیت را دارند امکان‌پذیراست [۶]، ولی این روش به دلیل تأخیر در عملکرد کنترل مکانیکی از کارایی چندانی برخوردار نیست و صرفاً می‌تواند از آن به منظور جلوگیری از شتاب گرفتن مولد در هنگامی که از شبکه جدا می‌شود استفاده نمود. در این مقاله به دنبال یک رویکرد پایداری جدید بر اساس فرکانس و کنترل حلقه قفل فاز (PLL[1]) هستیم تا با کنترل فاز و دامنه جریان اکتیو و راکتیو تزریقی، بتوان میزان نوسان را کاهش داد و در نتیجه باعث پایدار ماندن شبکه شد.

ادامه ساختار این مقاله به این صورت است. در بخش ۲ به انواع مختلف جبران سازها اشاره شده است. و در بخش ۳ به بیان تلفات همزمان سازی پرداخته شده است و در بخش ۴ روش پیشنهادی این مقاله و شبیه سازی های صورت گرفته ارئه گردیده و در پایان نتیجه گیری مقاله ارائه شده است.

۲- جبران سازها

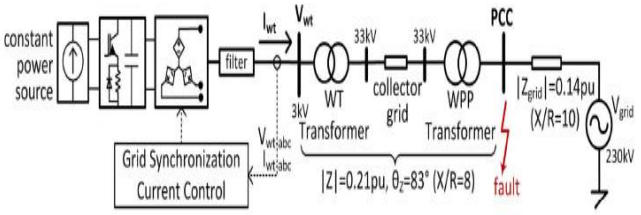
جهت جبران فرورفتگی ولتاژ، روش های مختلفی وجود دارد که برخی از آنها عبارتند از:

۱- جبران سازی فرورفتگی ولتاژ با استفاده از تجهیزات UPQC[2]
۲- جبران ساز استاتیکی توان (STATCOM[3])
۳- ترمز مقاومتی
۴- ذخیره ساز انرژی مغناطیسی ابررسانا (SMES)[4]
۵- سیستم ذخیره ساز خازنی (ECS)[5]

UPQC، یکی از راه‌های بهبود وضعیت پایداری ولتاژ شبکه با استفاده از SVC[6] و بانک خازنی بر روی نیروگاه‌های بادی است، SVC علاوه بر بهبود پایداری قادر به کاهش نوسانات دینامیکی ولتاژ نیز است ولی محدودیتی که SVC دارد در این است که ولتاژ و جریان تزریقی آن وابسته به هم بوده و توان تزریقی آن بر اساس امپدانس بار است و در ولتاژهای پایین نیازمند تزریق جریان بالا است. بنابراین در افت ولتاژهای عمیق نمی‌تواند توان راکتیو مورد نیاز ژنراتور را به خوبی تأمین کند [۷, ۸] زیرا نیازمند منبع ذخیره کننده انرژی بزرگ تری است. در این روش دامنه ولتاژ جبران می گردد ولی قادر به جبران سازی پرش زاویه فاز ولتاژ نمی‌باشد [۷, ۹].

جبران ساز استاتیکی توان(STATCOM) در نقش یک سوسپتانس متغیر عمل می‌کند که برای جبران سازی توان راکتیو به کارمی رود [۱۰]. همچنین ترمز مقاومتی ادواتی است که به صورت سری با ژنراتورها به کار گرفته می شوند و با مقایسه ولتاژ خروجی با ولتاژ مرجع، این اختلاف ولتاژ از یک کنترل کننده عبور کرده افت ولتاژ شبکه جبران می گردد عیب این کنترل کننده ها مصرف توان حقیقی می باشند[۱۰]. سیستم های ذخیره ساز انرژی مغناطیسی ابررسانا (SMES) و سیستم ذخیره سازی خازنی (ECS) و تمام روش‌های ذکرشده در بالا به منظور بهبود پشتیبانی شبکه نیروگاه‌های بادی نیز ارائه‌شده است. با این حال هر یک از مطالعات قبلی و روش‌های ارائه‌شده پیشین مسئله پایداری مبدل‌های سمت شبکه بر حسب رفتار دینامیکی فرکانس پایین و هماهنگ‌سازی شبکه تحت حضور خطاها را پوشش نمی‌دهند [۱۰, ۱۱] با توجه به استانداردهای جدید در بهره برداری از شبکه توربین‌های بادی در حضور خطا حتی زمانی که ولتاژ باس PCC برابر با صفر ولت می شود، ملزم به تولید و تزریق جریان راکتیو به شبکه می‌باشند[۴].

میزان جریان راکتیو و اکتیو تزریق‌شده به شبکه ممکن است باعث بهبود ولتاژ شبکه گردد ولی با توجه به شرایط شبکه ممکن است پایداری فرکانسی را شامل نگردد. عدم پایداری فرکانسی در این مقاله بعنوان تلفات همزمان سازی(LOS) نامیده شده است برای بررسی و شناسایی بهتر این موضوع در این مقاله، شبکه زیر به عنوان یک شبکه نمونه برای شبیه سازی در نظر گرفته شده است[۷] .



شکل ۱: مجموعه WPP[7] و مدار معادل تونن شبکه برای شبیه‌سازی [۷](base = 100MVA)

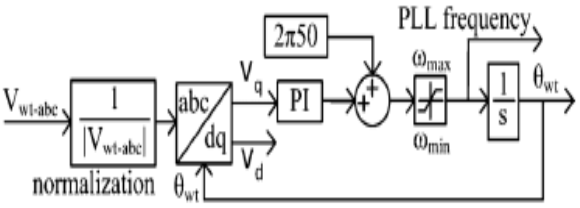
۳- تلفات همزمان سازی (LOS)

شبکه ارائه شده در شکل ۱ به عنوان یک شبکه نمونه است و توربین بادی مورد استفاده در این شبکه از نوع پیشرفته بوده است، یعنی یک توربین بادی با مقیاس کامل (FSCWT)[7] بوده و توانایی اعمال جریان راکتیو و اکتیو را به میزان لازم دارا است[۲, ۱۲]. در مثال زیر فرکانس اصلی شبکه (۵۰ هرتز) به عنوان مبنا اندازه‌گیری در نظر گرفته شده است و انحراف فرکانس توان تولیدی توسط مبدل‌های

[1] Phase Lock Loop(PLL)
[2] Unified Power QualityConditioner
[3] STATic synchronous COMpensator
[4] Superconducting Magnetic Energy Storegy
[5] Energy Capacitor System
[6] Static Var Compensator
[7] Full Scale Wind Turbine

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.1.2.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- spring & summer 2015

بادی از فرکانس اصلی شبکه به عنوان تلفات همزمان سازی LOS نام‌گذاری شده است[۱]. همچنین در شکل مورد آزمایش فوق سیستم WPP دارای توان نامی ۱۰۰ مگاواتی است و به عنوان یک توربین بادی منفرد پیاده‌سازی شده است. هماهنگ‌سازی شبکه و دستورات کنترلی جریان اکتیو و راکتیو در سمت ولتاژ پایین از طریق ترانسفورماتور WT صورت می‌گیرد. امپدانس بین WT و PCC که از ترانسفورماتور WT تشکیل‌شده، معادل شبکه جمع‌آوری شده است و ترانسفورماتور اصلی WPP دارای امپدانس کل ۰/۲۱ pu و نسبت X/R برابر ۸ است این امپدانس با نماد Z نشان داده شده است (Z=0.026 pu + j0.0208 pu) و زاویه‌ی $\theta_Z = 83^\circ$ $\tan^{-1} X/R$) است. شبکه اصلی با مدار معادل تونن آن با مقدار امپدانس ۰/۱۴ pu و X/R=10 است، همچنین WT به عنوان یک منبع توان ثابت در نظر گرفته شده است.کنترل جریان بر مبنای چارچوب همزمان سازی تنظیم‌کننده تناسبی– انتگرالی است الگوریتم هماهنگ‌سازی برای رسیدن به پهنای باند مطابق با استاندارد ENTSO-E در چارچوب یک PLL مبتنی برPI در شکل ۲ نمایش داده شده است .



شکل ۲: ساختار PLL معمولی

در الگوریتم فوق یک سیگنال فرکانس در PLL محاسبه شده است که برابر فرکانس ولتاژهای فاز اندازه‌گیری شده در ترمینال WT و هم چنین ولتاژ فاز تولیدشده در خروجی مبدل است. در عمل محدودیت اشباع برای فرکانس حاصله از PLL در نظر گرفته می‌شود (به عنوان مثال Fmax=60 HZ و Fmin=40 HZ) که نزدیک به فرکانس پایه تنظیم شده است و این امر امکان رد و بدل شدن فرکانس برای بهبود عملکرد ردیابی زاویه در حالت گذرا را به وجود می‌آورد[۱۳].با توجه به طراحی WPP شرح داده‌شده بر اساس یک روش معمول، در حین وقوع خطاهای ولتاژ پایین (نزدیک به صفر)، WT دارای یک جریان راکتیو ۱pu و یک دامنه نامعین از جریان اکتیو خواهد بود . نتایج حاصل از اعمال سه آزمایش در زیر ارائه‌شده است که بیانگر رفتار مدار نمونه در هنگام وقوع خطا می باشد:

آزمایش اول: در این حالت |Iactive| =0 pu و

|Ireactive| =1 pu است . به عبارتی خواهیم داشت:

($|I_{wt}| = 1\ \text{pu}, \theta_I = 90^\circ$) می‌باشد

آزمایش دوم: در این حالت $|I_{active}| = 0.65\ \text{pu}$ و $|I_{reactive}| = 1\ \text{pu}$ است و به عبارتی خواهیم داشت: $I_{wt} = I_d + jI_q = 0.65\ \text{pu} + j\ 1\ \text{pu}$ ($|I_{wt}| = 1.2\ \text{pu}, \theta_I = 57^\circ$)

آزمایش سوم:در این آزمایش شرایط را به گونه ای تنظیم می کنیم که $\theta_I = \theta_Z$ گردد.

$$\boldsymbol{I_{wt} = 0.125pu + j1pu\ (|I_{wt}| = 1.01pu, \theta_I = 83^\circ)}$$

نتایج حاصله از این آزمایشات در جدول ۱نشان داده شده است.

جدول ۱: خلاصه‌ای از نتایج شبیه‌سازی خطا[۱]

$\lvert V_{pcc}\rvert$	جریان توربین بادی (WT)	نتایج
٪۲۵	$\lvert I_{wt}\rvert \le maximum$	NO LOS
٪۲	$\lvert I_{wt}\rvert = 0$	NO LOS
	$\lvert I_{wt}\rvert = 1pu\ \ \theta_I = 90^\circ$	کاهش f_{wt} (LOS)
	$\lvert I_{wt}\rvert = 1.2pu\ \ \theta_I = 57^\circ$	افزایش f_{wt} (LOS)
	$\lvert I_{wt}\rvert = 1.01pu\ \ \theta_I = 83^\circ$	NO LOS

همان‌گونه که در جدول ۱ نشان داده شده است فرکانس در زمان وقوع خطا در آزمایش اول کاهش یافته و به سمت صفر متمایل می شود همچنین در آزمایش دوم بار دیگر فرکانس از مقدار پایه خود منحرف شده و به ۱۵۰ هرتز می رسد.بنابراین به دلیل وجود LOS، توربین بادی نمی‌تواند به حالت عملکرد پایدارش بازگردد زیر در طول خطا محاسبه LOS با اشتباه همراه است، که به معنی نادرست بودن کنترل بردار جریان اکتیو و راکتیو است. و در آزمایش سوم به دلیل اینکه $\theta_I = \theta_Z$ شده است هیچ LOS رخ نداده است. همان‌گونه که از در نتایج آزمایشات ۱و۲ مشاهده شد اگر یک جریان مرجع خارج از محدوده انتقال، تزریق شده باشد، LOS رخ می‌دهد و در طول مدت زمان رویداد LOS، PLL قابلیت ردیابی فرکانس پایه شبکه را از دست می‌دهد. به منظور تجزیه و تحلیل دینامیکی PLL، تجزیه و تحلیل پایداری سیگنال بزرگ در مرجع [۱۴] ارائه شده است، که به طور خاص برای مطالعات شبکه با اتصالات ضعیف توسعه داده شده است. در اینجا از همین مطالعه برای بررسی خطا استفاده گردیده است.

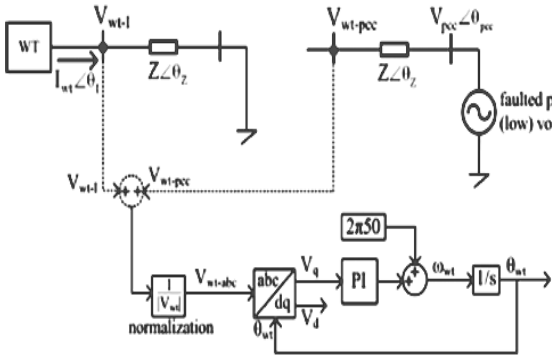
همان گونه که در شکل ۳ مشخص است بر اساس جمع آثار ولتاژ V_{wt} از ترکیب دو ولتاژ V_{wt} در ترمینال WT حاصل می‌گردد و ولتاژ V_{wt} که به صورت فیدبک به PLL متصل می‌شود، طبق روابط زیر به دست می‌آید.

$$V_{wt} = V_{wt-I} + V_{wt-pcc} \quad (۲)$$

$$V_{wt-I} = Z < \theta_z . I_{wt} < \theta_I \quad (۳)$$

$$V_{wt-pcc} = V_{pcc} < \theta_{pcc} \quad (۴)$$

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.1.2.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- spring & summer 2015
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]



شکل ۳: ولتاژهای توربین بادی که از طریق جمع آثار دو منبع حاصل شده است[۱۴]

همان‌گونه در شکل ۲ نشان داده شده است مؤلفه‌ی ولتاژ WT بر روی محور q به عنوان ورودی خطای جبران ساز PI در PLL در نظر گرفته شده است. ولتاژ مؤلفه‌ی محور q را می‌توان بر حسب دو مؤلفه ولتاژ که در روابط (۳) و (۴) بیان شده است به صورت روابط زیر بیان کرد.

$$V_{q^-} = \sin\theta_v \ . V_{pcc} \quad (۵)$$

$$V_{q^+} = \sin(\theta_z - \theta_I) \, . Z. \ I_{wt} \quad (۶)$$

$$V_q = V_{q^-} + V_{q^+} \quad (۷)$$

که در آن θ_V اختلاف فاز بین ولتاژهای باسPCC وWT است. سیگنال فیدبک انتقالی از ولتاژ PCC (V_{q^-}) که در رابطه (۵) نشان داده شده است، برای PLL یک فیدبک منفی جهت ردیابی فاز θ_{pcc} فراهم می‌کند با این حال سیگنال فیدبک اعمالی از تزریق جریان WT (V_{q^+}) که در رابطه (۶) بیان‌شده است به صورت یک فیدبک مثبت رفتار می‌کند که می‌تواند به عنوان یک اختلال به پایداری PLLدر نظر گرفته شود. پایداری سیگنال بزرگ PLL مستلزم دامنه فیدبک منفی بزرگ‌تری نسبت به فیدبک مثبت است که در رابطه (۸) و (۹) این محدودیت نشان داده شده است.

$$|V_{q^-}| > |V_{q^+}| \quad (۸)$$

$$|V_{PCC}\sin(\theta_V)| > |Z.I_{wt}.\sin(\theta_Z - \theta_I)| \quad (۹)$$

با داشتن فیدبک منفی مناسب، PLL توانایی دنبال کردن سیگنال ورودی دارا می باشد

۴- روش پیشنهادی

به طور خلاصه از تجزیه و تحلیل‌های ارائه‌شده در قسمت قبل، سه دلیل اصلی تشکیل‌دهنده LOS به شرح زیر است:

۱- وقوع خطای شدید در نزدیکی PCC با ولتاژ نزدیک به صفر (به عنوان مثال کمتر از ۲۰٪ از مقدار نامی)

۲- الزامات استانداردهای شبکه برای تزریق جریان راکتیو شامل خطاهای ولتاژ صفر

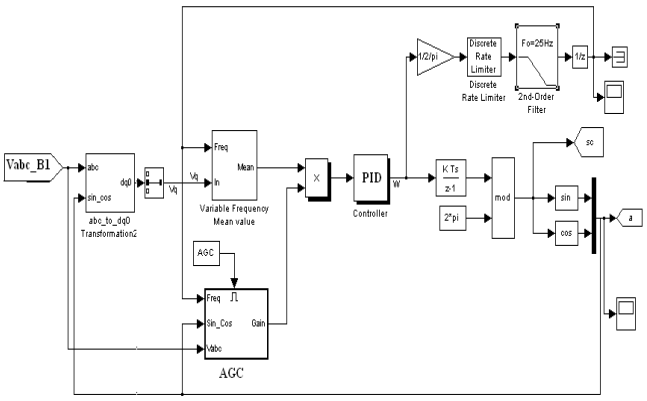
۳- کنترل (بردار) جریان اکتیو و راکتیو مراجع تولیدشده توسط روش سنتی

روش پیشنهادی در این مقاله روش کنترل حلقه بسته بر مبنای کنترل فرکانس PLL برای جلوگیری از ایجاد LOS پیشنهاد شده است. این روش مبتنی بر فرکانس PLL است که از سیگنال فرکانس PLL به عنوان فیدبک برای تشخیص هر LOS و تنظیم همزمان جریان مرجع اکتیو و راکتیو برای جلوگیری از ایجاد LOS استفاده می‌کنند جریان مرجع راکتیو در این طرح مطابق با الزامات استانداردهای شبکه تنظیم شده است و جریان مرجع اکتیو با پیروی از الگوریتم سنتی تولید می‌شود و تنظیم‌کننده فرکانس به موازات آن طوری تنظیم می‌شود که دامنه جریان مرجع اکتیو پایین تر از محدودیت انتقالی بازدارنده LOS، نگه داشته شود. جبران ساز فرکانس به صورت یک جبران ساز PI طراحی شده است فیدبک فرکانس PLL با یک مقدار مرجع که همان فرکانس شبکه است مقایسه شده و نتیجه نهایی با اعمال جریان اکتیو و راکتیو به شبکه اعمال می‌گردد.

۴-۱ مدل سازی روش پیشنهادی

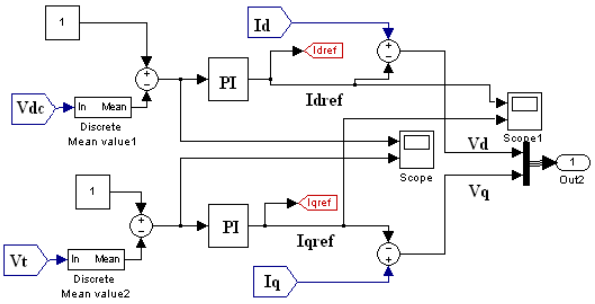
با توجه به مطالب ذکرشده درقسمت های قبل، همچنین با استفاده از شبکه نمونه شکل ۱ و الزامات ذکرشده و مدار نمونه شکل ۳ برای توربین بادی و شبکه، مدل پیشنهادی در این مقاله ارائه شده و به کمک نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی گردیده است. در مدار ارائه شده در شکل ۴، بلوک محاسبه گر PLL جهت نمونه‌برداری از فرکانس، ولتاژ و جریان شبکه مورد استفاده قرارگرفته است.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.1.2.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- spring & summer 2015 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]



شکل ۴: مدار شبیه ساز ی شده حلقه PLL در متلب

در بلوک فوق نمونه برداشته شده از فرکانس خروجی توربین، وارد بخش PLL می گردد که در بلوک Automation Gain control قرار دارد و سپس از طریق PID کنترل و یک عدد فیلتر، فرمان لازم برای کنترل فرکانس خروجی توربین تهیه می‌گردد. فرکانس خروجی از طریق فیلتر بین ۴۵ تا ۶۰ هرتز تنظیم گردیده است. در بلوک PID کنترل تنها از ضرایب P و I استفاده شده است و ضریب D برابر با صفر در نظر گرفته شده است. زیرا وجود ضریب D می‌تواند تنظیم کنترل را سخت تر و حتی نوسانی کند جهت تامین جریان اکتیو و راکتیو بلوک شکل ۵ طراحی گردیده است.

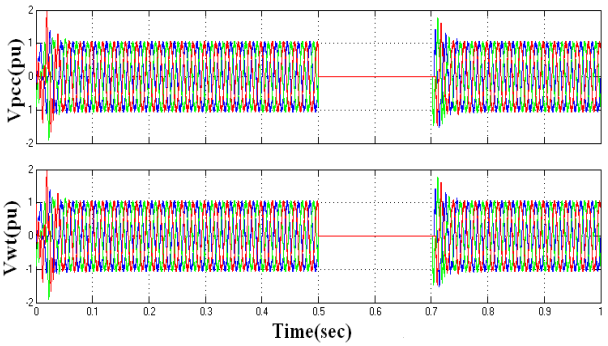


شکل ۵: بلوک کنترل‌کننده ولتاژ و توان

در این بلوک علاوه بر رصد جریان خروجی شبکه، یک جریان مرجع ساخته‌شده که کنترل توان اکتیو و راکتیو اعمالی توسط توربین را بر عهده دارد. در این بلوک از قوانین تبدیل منابع بهره گرفته شده است. جریان راکتیو لازم توربین بادی از طریق ترمینال ولتاژ خروجی توربین Vt و مقایسه آن با مقدار مرجع یک پریونیت، تأمین می‌گردد. جریان اکتیو از یک منبع DC و یا یک بانک خازنی مربوط به توربین تأمین می‌شود که این امر به وسیله Vdc و مقایسه آن با مقدار مرجع یک پریونیت حاصل شده است، جریان حاصله به یک کنترل‌کننده PI اعمال گردیده که جریان Iqref و Idref حاصل می‌گردد. جریان‌های ساخته‌شده با جریان Id و Iq مربوط به باس شبکه مقایسه می‌شود و فرمان‌های لازم جهت اعمال به مدار کنترل‌کننده ولتاژ خروجی توربین حاصل می‌شود.

۴-۲ شبیه سازی

روش پیشنهادی در این مقاله در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی و اعتبارسنجی گردیده است در این شبیه‌سازی با اعمال بار به شبکه ، یک خطا در مدت زمان ۰/۲ ثانیه در فاصله زمانی ۰/۵ تا ۰/۷ ثانیه در محل اتصال شبکه و توربین بادی اعمال گردیده و نتایج زیر حاصل شده است.

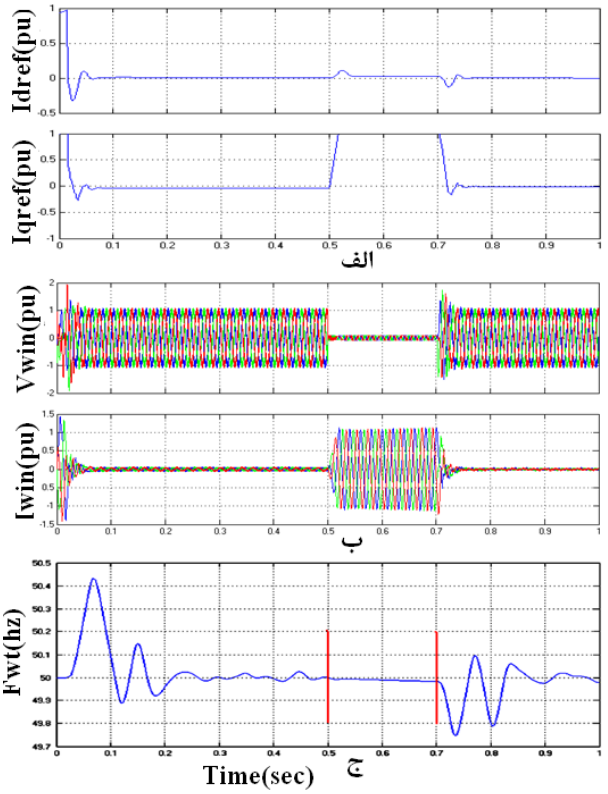


شکل ۶: ولتاژ شبکه و توربین بادی در هنگام وقوع خطا

در شکل ۶ ولتاژ توربین و شبکه بصورت همزمان نشان داده شده است که در نقطه اتصال باس شبکه و توربین بادی جهت شبیه سازی ، یک خطای سه فاز به سیستم در فاصله زمانی ۰/۵ تا ۰/۷ ثانیه اعمال شده است و ولتاژ تا نزدیک صفر کاهش می‌یابد

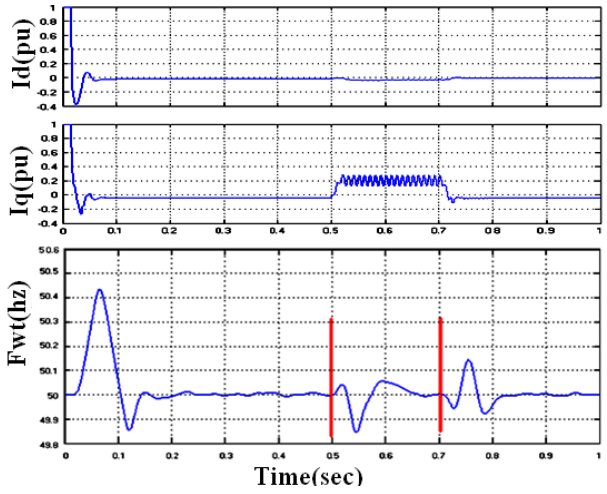
نتایج حاصله از این شبیه سازی درشکل ۷ نمایش داده شده است در این شکل جریان اکتیو و راکتیو اعمالی به شبکه در زمان قبل و بعد اعمال خطا همچنین ولتاژ و جریان توربین و فرکانس آن در یک بازه زمانی یک ثانیه به نمایش در آمده و رفتار توربین در زمان قبل و بعد از اعمال خطا را نشان می دهد.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.1.2.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- spring & summer 2015
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]



شکل ۷: نتایج شبیه سازی مدار نمونه

جریان اعمال شده به شبکه توسط توربین در شکل ۷ (الف) نمایش داده شده است. جریان راکتیو به میزان یک پریونیت و میزان جریان اکتیو متناسب با نیاز در زمان وقوع خطا در بلوک کنترل‌کننده ولتاژ و توان ساخته شده به مدار اعمال می گردد. در این بلوک میزان جریان اعمالی با توجه به خطای بوجود آمده از مقایسه جریان خروجی توربین و جریان مرجع، جریان اعمالی مورد نیاز حاصل می گردد. همچنین فازهای ولتاژ و جریان ترمینال توربین بادی در شکل ۷ (ب) نشان داده شده است. و به وضوح تغییرات جریان توربین در هنگام بروز خطا نشان داده شده است که میزان این جریان با توجه به میزان خطا متفاوت می باشد و توربین با اعمال این جریان برای رفع خطا تلاش می کند. در شکل ۷(ج) فرکانس خروجی توربین بادی که از مدار محاسبه گر PLL نتیجه گردیده نشان داده شده است، در مدت زمان وقوع خطا که در فاصله زمانی ۰/۵ تا ۰/۷ ثانیه می‌باشد. فرکانس خروجی توربین، که مبنای آن ۵۰ هرتز است حداکثر به میزان ۰/۱ ۰کاهش یافته که بیان کننده این است که مدار به خوبی توانسته است فرکانس خروجی را ثابت نگاه دارد و کنترل جریان خروجی به خوبی صورت گرفته شده است و حتی بعد از بازگشت شبکه به حالت عادی و رفع خطا، شوک حاصله در فرکانس نیز حداکثر ۰/۲ هرتز می‌باشد. همچنین برای نشان دادن عملکرد بهتر مدار در فاصله زمانی ۰/۵ تا ۰/۷ ثانیه یک خطای تکفاز به مدار فوق اعمال و نتایج آن در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸: نتایج شبیه سازی شده حاصل از خطای تکفاز

همان گونه که در شکل فوق مشاهده می شود مدار در حضور خطای تکفاز با اعمال جریان راکتیو کمتری نسبت به حالت سه فاز و اعمال جریان اکتیو متناسب، توانسته است فرکانس مبنا را دنبال کند. که این امر نشان‌دهنده صحت عملکرد مدار طراحی شده و روش پیشنهادی این مقاله می باشد.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله پایداری دینامیکی فرکانس مبدل توربین‌های بادی در هنگام تزریق جریان به خطاهای ولتاژ پایین، شبکه مورد بررسی قرارگرفته است. استفاده از کنترل‌کننده‌های PLL می‌تواند یک روش جدید در کنترل توربین‌های بادی در اختیار ما قرار دهد. اما این کنترل‌کننده‌ها به تنهایی نمی تواند باعث پایداری فرکانس مبدل‌های توربین بادی باشد. تزریق جریان اکتیو و راکتیو و کنترل برداری جریان اکتیو و راکتیو می‌تواند در صورت تنظیم درست جریان‌ها، خطای همزمان سازی فرکانس را کاهش دهد. که این امر در این مقاله با رصد جریان و ولتاژ شبکه محقق شده است. ثابت ماندن فرکانس خروجی توربین بادی در خطاهای سه فاز و تک فاز مورد بررسی و اعتبارسنجی قرار گرفت و مشاهده شد که مدار پیشنهادی به خوبی توانسته است فرکانس شبکه را دنبال کند، در صورتی که مرجع [۱] و سایر مراجع خطاهای تک فاز مورد ارزیابی قرار نگرفته است. در روش پیشنهادی این مقاله علاوه بر رعایت الزامات شبکه در هنگام وقوع خطا، مشاهده شد حداکثر انحراف فرکانسی در خطا های مختلف از میزان ۰/۰۱۵ تجاوز نمی کند، در

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.1.2.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- spring & summer 2015 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]

صورتی که در سایر مقالات ارائه شده این امر از ۰/۵ تا ۵ هرتز می باشد که این امر نشان دهنده صحت عملکرد مدار و روش پیشنهادی می باشد. نتایج حاصله که بیانگر پایداری فرکانس و شبکه می باشد، می‌تواند به منظور فراهم‌سازی عملیات پایدار سازی سیستم های قدرت با درصد نفوذ بالای انرژی بادی، کارآمد و مفید باشد.

بر این مبنا می‌توان پیشنهادهای زیر را ارائه نمود:

- می توان روش پیشنهادی در مبدل‌های HVDC به عنوان یک منبع کنترل شده با جریان متصل به شبکه در نظر گرفت، مبدل‌های HVDC و دیگر مبدل‌ها و منابع کنترل شده با جریان در هنگام بروز خطا می‌توانند رفتارهای متفاوتی از خود نشان بدهند که می‌توان روش پیشنهادی را به عنوان کنترل جریان در سایر مدارت در نظر گرفت
- در هنگام بروز خطا جریان زیای از روتور کشیده می‌شود، بررسی کیفیت توان اکتیو و راکتیو اعمال‌شده و جریان هجومی در روتور در هنگام بروز خطا می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.
- با توجه به روش‌های مختلف کلید زنی و کنترل جریان، بررسی هارمونیک ها و نویز ها در بخش‌های مختلف و تأثیر آن‌ها بر عملکرد مدارهای کنترلی و اثر گذاری آن‌ها بر مدارات الکترونیکی می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.
- یکی از خطاهایی که تأثیر مخربی در صنعت دارد خطای عدم تعادل است، خطای عدم تعادل ولتاژ موجود، شبکه‌های صنعتی را دچار اخلال نموده و باعث ناپداری منابع متصل به شبکه می‌شود که این امر را می‌توان در غالب روش پیشنهادی مورد ارزیابی قرارداد.

مراجع:

[1] Goksu, Ömer et al., *Instability of wind turbine converters during current injection to low voltage grid faults and PLL frequency based stability solution.* Power Systems, IEEE Transactions on, 2014. **29**(4): p. 1683-1691.

[2] F. Sulla, *Fault behavior of wind turbines*. 2012, Lund University.

[3] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodriguez, *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*. Vol. 29. 2011: John Wiley & Sons.

[4] European Network for Transmission System Operators for Electricity, *ENTSO-E network code for requirements for grid connection applicable to all generator*. Jun. 2012.

[5] M. Aryanezhad, E. Ostadaghaee, and M. Joorabian. *Low Voltage Ride Through Capability Enhancement in Wind Farms by UPQC Based Fuzzy Controller*. in *13th Iranian Conference on Fuzzy Systems (IFSC)*. 2013.

[6] J. Slootweg and W. Kling, *The impact of large scale wind power generation on power system oscillations.* Electric Power Systems Research, 2003. **67**(1): p. 9-20.

[7] Chompoo-Inwai, C., et al., *Reactive compensation techniques to improve the ride-through capability of wind turbine during disturbance.* Industry Applications, IEEE Transactions on, 2005. **41**(3): p. 666-672.

[8] N.G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding facts:Conceps and Technology of Flexible AC Transmission Systems,*. 2000: IEEE press.

[9] M. Basu, S. Das, and G.K. Dubey, *Investigation on the performance of UPQC-Q for voltage sag mitigation and power quality improvement at a critical load point.* Generation, Transmission & Distribution, IET, 2008. **2**(3 :(p. 414-423.

[10] Erlich, I., et al. *Effect of wind turbine output current during faults on grid voltage and the transient stability of wind parks*. in *Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES'09. IEEE*. 2009. IEEE.

[11] P. Rodríguez et al., *Multiresonant frequency-locked loop for grid synchronization of power converters under distorted grid conditions.* Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2011. **58**(1): p. 127-138.

[12] M. Kayikci and J.V. Milanovic, *Reactive power control strategies for DFIG-based plants.* Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2007. **22**(2): p. 389-396.

[13] A. Yazdani and R. Iravani, *Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications*. 2010: John Wiley & Sons.

[14] D. Dong, et al. *Frequency behavior and its stability of grid-interface converter in distributed generation systems*. in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2012 Twenty-Seventh*

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.1.2.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- spring & summer 2015 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]

Annual IEEE. 2012. IEEE.



گلنوش قربانی در مسجد سلیمان متولد شده است (۱۳۶۳) تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- الکترونیک از دانشگاه نجف آباد (۱۳۸۸) و کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت از دانشگاه علوم وتحقیقات یاسوج (۱۳۹۴) اخذ نموده است فعالیت های پژوهشی و علاقمندی ایشان در زمینه توربین های بادی ، انرژی های نو و اتوماسیون صنعتی می باشد



سعید رحمتی در آبادان متولد شده است (۱۳۵۰) تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- الکترونیک از دانشگاه نجف آباد (۱۳۷۴) و کارشناسی ارشد برق- الکترونیک از دانشگاه علوم و تحقیقات تهران (۱۳۸۲) اخذ نموده است و در حال حاضر نیز دانشجوی دکتری مهندسی برق - الکترونیک دانشگاه ماهشهر است فعالیتهای پژوهشی و علاقمندی ایشان در زمینه A/D ، سنسور و کنترل سیستم و اتوماسیون صنعتی می باشد



مهدی کرمی در شهرستان آباده (۱۳۵۸) متولد شده است. تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی در دانشگاه تهران (۱۳۸۱) فوق لیسانس (با کسب عنوان دانشجوی رتبه اول) (۱۳۸۳) و تحصیلات دکتری را در سال ۱۳۹۲ در دانشگاه علم و صنعت ایران به پایان رسانده است. زمینه‌های کاری مورد علاقه ایشان سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر، شبکه‌های هوشمند، بهره‌برداری و برنامه‌ریزی در سیستم‌های قدرت و سیستم‌های تجدید ساختار شده می‌باشد. ایشان عضو انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران می‌باشد



سید محسن سید موسوی در اهواز متولد شده است (۱۳۵۳) تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی ارشد مهندسی برق- الکترونیک از دانشگاه یزد (۱۳۷۶) و کارشناسی ارشد مهندسی برق- مخابرات سیستم از دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۷۸) اخذ نموده است و در حال حاضر نیز دانشجوی دکتری مهندسی برق کنترل دانشگاه علوم و تحقیقات تهران است. فعالیت های پژوهشی و علاقمندی ایشان در زمینه تخمین، خطا و کالیبراسیون سنسورها و کنترل سیستم است و در حال حاضر عضو هیئت علمی گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز می باشد

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.1.2.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- spring & summer 2015
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]