

کنترل فرکانس بار در ریزشبهه جزیره‌ای با استفاده از کنترل پیش‌بین مدل

فرهاد امیری^۱، علیرضا حاتمی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

f.amiri94@basu.ac.ir

۲- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

hatamisharif@basu.ac.ir

چکیده: یکی از موضوعات مهم و اساسی ریزشبهه‌ها، در حالت جدا از شبکه قدرت، کنترل فرکانس و ولتاژ است. در این مقاله روشی مبتنی بر کنترل پیش‌بین مدل برای کنترل مقاوم فرکانس بار در یک ریزشبهه جزیره‌ای ارائه شده است. کنترل‌کننده پیشنهادی در حلقه ثانویه کنترل فرکانس قرار دارد و با اعمال سیگنال کنترلی به منابع، اغتشاشات فرکانس به دنبال تغییرات توان در ریزشبهه کاهش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی انجام شده در محیط متلب/سیمولینک نشان می‌دهد کنترل‌کننده پیشنهادی، عملکردی بهتری در مقایسه با کنترل‌کننده‌های تناسبی - انتگرالی مبتنی بر روش زیگلر - نیکولز (ZN-PI)، تناسبی - انتگرالی مبتنی بر منطق فازی (Fuzzy-PI)، تناسبی - انتگرالی - مشتقی مرتبه کسری مبتنی بر الگوریتم ذرات بهینه کانونی (CPSO-FOPID) و تناسبی - انتگرالی - مشتقی مبتنی بر الگوریتم ذرات بهینه کانونی (CPSO-PID) دارد؛ به طوری که ۱- نوسانات فرکانس از نظر دامنه نوسان و تعداد آن به طور مؤثری کاهش می‌یابد؛ ۲- نسبت به عدم قطعیت پارامترهای ریزشبهه مقاوم‌تر است و عملکرد بهتری هنگام تغییر پارامترها نسبت به دیگر روش‌ها دارد.

واژه‌های کلیدی: ریزشبهه، کنترل فرکانس بار، کنترل پیش‌بین مدل

۱- مقدمه

و تجدیدپذیر انرژی، گزینه‌های جدید و مناسبی هستند که طی دو دهه اخیر معرفی شده‌اند [۱]؛ مزایای منابع انرژی تجدیدپذیر، سبب برنامه‌ریزی برای به‌کارگیری بیشتر آنها در صنعت برق و گسترش روزافزون ریزشبهه‌ها در بیشتر کشورهای جهان شده است [۲]. ریزشبهه‌ها، شبکه‌های قدرت کوچکی هستند که از چندین منبع انرژی تجدیدپذیر و بارهای محلی تشکیل شده‌اند. ریزشبهه‌ها عموماً در حالت عادی به یکی از شبکه‌های شبکه توزیع متصل هستند؛ اما در حالت اضطراری، در صورت رخداد اغتشاش‌های بزرگ، از شبکه قدرت جدا می‌شوند و برخی بارها (بارهای مهم) را تغذیه می‌کنند. با توجه به تغییر درخور توجه سرعت باد، شدت تابش آفتاب، تغییرات و نوسانات بار یکی از مسائل مهم در ریزشبهه‌های جدا از شبکه اصلی، کنترل و میرا کردن نوسانات فرکانس و توان هستند. این موضوع هم در بازه‌های زمانی متناظر با بهره‌برداری و مدیریت (که هدف آن میرا کردن

با افزایش روزافزون مصرف انرژی الکتریکی در جهان، صنعت برق با مسائلی همچون هزینه زیاد احداث نیروگاه‌های جدید و توسعه شبکه‌های انتقال، فوق توزیع و توزیع، نگرانی‌های زیست محیطی و تغییرات آب و هوایی مواجه شده است. به منظور غلبه بر مشکلات مذکور، افزایش قابلیت اطمینان در سرویس‌دهی به مشتریان و کاهش تراکم و تلفات در خطوط انتقال و فوق توزیع، منابع تولید پراکنده

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۱۳

نام نویسنده مسئول: علیرضا حاتمی

نشانی نویسنده مسئول: ایران، همدان، دانشگاه بوعلی‌سینا، دانشکده مهندسی، گروه برق

مرجع [۲۸،۲۹] نیز از کنترل ثانویه فرکانس بر روی مدل منابع تولید انرژی تجدیدپذیر برای کنترل فرکانس بار استفاده کرده‌اند.

یکی از کنترل‌کننده‌های مناسب برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های گوناگون در یک سیستم، کنترل پیش‌بین است که توانایی پیش‌بینی رخدادهای آینده و اتخاذ اعمال کنترلی مناسب را داراست [۳۰]. در [۳۱،۳۲] کنترل پیش‌بین (MPC^9)، در [۳۳] کنترل پیش‌بین دو سطحی و در [۳۴] از کنترل پیش‌بین چندگانه با در نظر گرفتن شارژ و دشارژ خوروهای هیبریدی الکتریکی برای کاهش نوسانات توان منابع در بازه‌های زمانی متناظر با بهره‌برداری و مدیریت ریزشبهه (اعمال سیگنال‌های کنترلی در بازه‌های زمانی چند دقیقه‌ای) استفاده شده است. همچنین در [۳۵] روشی برای ارائه کنترل هماهنگ پره‌های توربین بادی و خودروهای هیبرید الکتریکی، مبتنی بر کنترل پیش‌بین، به منظور کاهش نوسانات توان و فرکانس در ریزشبهه ارائه شده است.

در مقاله حاضر یک کنترل پیش‌بین برای کنترل فرکانس بار در یک ریزشبهه ارائه شده است. روش کنترل پیشنهادی در حلقه کنترل ثانویه فرکانس استفاده می‌شود و سیگنال کنترلی به منابع انرژی تجدیدپذیر در ریزشبهه اعمال می‌شود. ریزشبهه در نظر گرفته شده در بردارنده انواع منابع انرژی تجدیدپذیر است که مدل دینامیکی (سیگنال کوچک) آنها حول نقطه کار قرار گرفته و معادلات حالت ریزشبهه استخراج شده است. کنترل‌کننده پیشنهادی برای میرا کردن تغییرات فرکانس ریزشبهه در شرایط معمولی و همچنین در هنگام عدم قطعیت و تغییر پارامترها نسبت به کنترل‌کننده‌هایی همچون $ZN-PI^{11}$ ، $Fuzzy-PI^{11}$ ، $CPSO-PI^{12}$ و $FOPID^{12}$ عملکرد مطلوب‌تر و بهتری ارائه می‌دهد. بنابراین نوآوری مقاله عبارت‌اند از: ۱- ارائه روشی جدید برای میرا کردن نوسانات فرکانس در ریزشبهه (جدا از شبکه اصلی) مبتنی بر کنترل پیش‌بین؛ ۲- اثبات کارایی و عملکرد بهتر کنترل‌کننده پیشنهادی در میرا کردن فرکانس (در شرایط معمولی و همچنین در مواجهه با عدم قطعیت پارامترها) در مقایسه با دیگر کنترل‌کننده‌ها، با شبیه‌سازی و مقایسه نتایج عملکرد آنها در مسئله کنترل بار - فرکانس.

نوسانات توان است) و هم در بازه‌های زمانی متناظر با کنترل فرکانس بار (LFC) شایان توجه قرار گرفته است. در موضوع کنترل فرکانس بار، هدف، میرا کردن سریع نوسانات و اطمینان از عملکرد دینامیکی سیستم است؛ به طوری که نوسانات در محدوده رضایت‌بخشی واقع شوند [۳].

تحقیقات متعددی در زمینه کنترل فرکانس بار در ریزشبهه‌ها ارائه شده‌اند. در [۴،۶] بر کارهای صورت گرفته در این زمینه مروری شده است. تحقیقات مذکور در زمینه طراحی کنترل‌کننده‌ها به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: کنترل‌کننده‌های مبتنی بر روش‌های مرسوم و کنترل‌کننده‌های مبتنی بر روش‌های فرا ابتکاری.

در [۷،۸] کنترل‌کننده‌های مبتنی بر کنترل تناسبی - انتگرالی (PI^1) و کنترل‌کننده تناسبی - انتگرالی - مشتقگیر (PID^2) مبتنی بر تعیین ضرائب با روش زیگلر - نیکولز [۹] و مرتبه کسری [۱۰] را برای کنترل فرکانس بار در ریزشبهه ارائه داده‌اند. در [۱۱،۱۳] از روش‌های کنترل مقاوم برای طراحی کنترل‌کننده استفاده شده است؛ به طوری که مراجع [۱۱،۱۲] کنترل اچ - بینهایت (H_∞) و [۱۳] الگوریتم سیر تکاملی مبتنی بر روش تکرار $D-K^4$ را ارائه داده‌اند. در [۱۴،۱۸] روش کنترل افقی (در [۱۴،۱۶] کنترل مبتنی افق خطی، [۱۷] کنترل مبتنی بر افت غیر خطی و [۱۸] کنترل مبتنی بر افت خطی همراه با بارهای کنترل‌پذیر) برای کنترل فرکانس بار در ریزشبهه ارائه شده است. در [۱۹] از کنترل مد لغزشی مبتنی بر مشاهده‌گر برای کنترل فرکانس بار در ریزشبهه استفاده شده است.

از کنترل‌کننده‌های مبتنی بر الگوریتم‌های فرا ابتکاری به مواردی همچون الگوریتم ژنتیک (GA^5) [۲۰]، الگوریتم ازدحام ذرات (PSO^6) [۲۱]، الگوریتم رفتار اجتماعی عنکبوت (SSO^7) [۲۲]، الگوریتم جست‌وجوی جغرافیای زیستی (BBO^8) برای تنظیم PID [۲۳] و الگوریتم جست‌وجوی هارمونی توسعه یافته [۲۴] برای کنترل فرکانس بار در ریزشبهه اشاره می‌شود. مراجع [۲۵،۲۷] از کنترل‌کننده فازی که ضرائب آن با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات تعیین شده‌اند [۲۵] و منطق فازی نوع دو [۲۶،۲۷] برای کنترل فرکانس بار استفاده شده‌اند.

مدل سیگنال کوچک هر یک از اجزای ریزشبکه عبارت‌اند از:

۲-۲-۱- توربین بادی (WTG)

مدل دینامیکی توربین بادی برای تحلیل سیگنال کوچک با رابطه (۱) و تابع مشخصه آن با رابطه (۲) بیان می‌شود [۲۵،۳۷]

$$\Delta \dot{P}_{WTG} = \frac{k_a k_{WTG} \Delta P_W}{T_{WTG}} - \frac{\Delta P_{WTG}}{T_{WTG}} \quad (1)$$

$$G_{WTG}(s) = \frac{k_a k_{WTG}}{1 + sT_{WTG}} = \frac{\Delta P_{WTG}(s)}{\Delta P_W(s)} \quad (2)$$

در روابط (۱) و (۲)، k_{WTG} و T_{WTG} به ترتیب بهره و ثابت زمانی توربین بادی، k_a : ضریبی عددی که بیان‌کننده درصد توان توربین بادی است که به ریزشبکه تحویل می‌شود، ΔP_{WTG} : تغییرات توان الکتریکی خروجی توربین بادی و ΔP_W : تغییرات توان بادی هستند. توان مکانیکی بادی استحصال‌شده (P_W) از رابطه (۳) به دست می‌آید [۲۵].

$$P_W = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot A_r \cdot V_w^3 \quad (3)$$

در رابطه (۳)، C_p : ضریب بهره‌برداری توربین، ρ : چگالی هوا (kg/m^3)، A_r : سطح جاروب‌شده از پره (m^2) و V_w : سرعت باد (m/s) هستند.

۲-۲-۲- سلول خورشیدی (PV)

مدل دینامیکی سلول خورشیدی در تحلیل سیگنال کوچک با رابطه (۴) و تابع مشخصه آن با رابطه (۵) بیان می‌شوند [۲۵،۳۷].

$$\Delta \dot{P}_{PV} = \frac{k_{PV} \Delta \phi}{T_{PV}} - \frac{\Delta P_{PV}}{T_{PV}} \quad (4)$$

$$G_{PV}(s) = \frac{k_{PV}}{1 + sT_{PV}} = \frac{\Delta P_{PV}(s)}{\Delta \phi(s)} \quad (5)$$

در روابط (۴) و (۵)، k_{PV} و T_{PV} به ترتیب بهره و ثابت زمانی سلول خورشیدی، ΔP_{PV} : تغییرات توان الکتریکی خروجی سلول خورشیدی و $\Delta \phi$: تغییرات شدت تابش خورشید هستند. توان الکتریکی سلول خورشیدی از رابطه (۶) به دست می‌آید [۲۵،۳۷].

$$P_{PV} = \eta S \phi [1 - 0.005 \times (T_a + 25)] \quad (6)$$

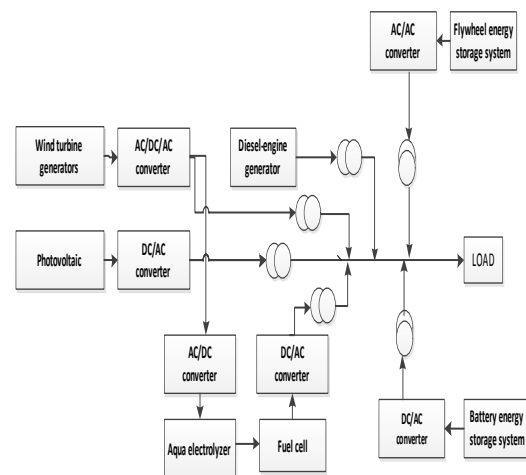
مقاله در بخش‌های زیر تدوین شده است؛ بخش دوم: ساختار کلی ریزشبکه و استراتژی کنترلی؛ بخش سوم: عملکرد دینامیکی اجزاء ریزشبکه؛ بخش چهارم: کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل؛ بخش پنجم: شبیه‌سازی و بخش ششم: نتیجه‌گیری و مراجع.

۲- ساختار کلی ریزشبکه‌ها و استراتژی

کنترلی موجود

۲-۱- ساختار ریزشبکه

شکل (۱) شماتیک ریزشبکه مطالعه‌شده را نشان می‌دهد که در حالت جدا از شبکه اصلی قرار دارد. ریزشبکه استفاده‌شده شامل یک سلول خورشیدی (PV^4)، یک دیزل ژنراتور معمولی (DEG^5)، یک توربین بادی (WTG^6)، یک پیل سوختی (FC^7)، و دو منبع ذخیره انرژی شامل باتری ($BESS^8$) و چرخ طیار ($FESS^9$) و الکترولیزر (AE^{10}) هستند [۲۵،۳۶]. منابع انرژی استفاده‌شده در ریزشبکه با مبدل‌های الکترونیک قدرت به باس اصلی متصل می‌شوند و از همین مبدل‌ها توان تزریقی آنها به باس اصلی کنترل می‌شود.



شکل (۱): شماتیک ریزشبکه [۳۶]

۲-۲- مدل سیگنال کوچک اجزای ریزشبکه

برای بررسی مسئله کنترل بار - فرکانس در ریزشبکه، لازم است از مدل سیگنال کوچک منابع انرژی تجدیدپذیر و ذخیره‌سازها (که حول نقطه کار خطی شده‌اند) استفاده شود.

کنترل فرکانس بار در ریزشبهه جزیره‌ای با استفاده از کنترل پیش‌بین مدل

الکترولایزر، ΔP_i و تغییرات توان ورودی به الکترولایزر هستند.

۲-۲-۵- پیل سوختی (FC)

پیل سوختی با استفاده از هیدروژن تولیدی با الکترولایزر، انرژی الکتریکی تولید می‌کند. مدل دینامیکی پیل سوختی در تحلیل سیگنال کوچک با رابطه (۱۱) و تابع مشخصه آن در رابطه (۱۲) توصیف شده است [۱۰،۳۷].

$$\Delta \dot{P}_{FC} = \frac{k_{FC} \Delta P_{AE}}{T_{FC}} - \frac{\Delta P_{FC}}{T_{FC}} \quad (11)$$

$$G_{FC}(s) = \frac{k_{FC}}{1+sT_{FC}} = \frac{\Delta P_{FC}(s)}{\Delta P_{AE}(s)} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲) k_{FC} و T_{FC} به ترتیب بهره و ثابت زمانی پیل سوختی و ΔP_{FC} : تغییرات توان الکتریکی خروجی پیل سوختی هستند.

۲-۲-۶- سیستم ذخیره باتری (BESS) و چرخ طیار (FESS)

سیستم ذخیره باتری (چرخ طیار)، انرژی الکتریکی دریافتی را به صورت انرژی شیمیایی (مکانیکی) ذخیره می‌کند. باتری و چرخ طیار مازاد انرژی در ریزشبهه را ذخیره و کمبود انرژی الکتریکی را تأمین می‌کنند. در تحلیل سیگنال کوچک، مدل دینامیکی باتری و چرخ طیار به ترتیب با روابط (۱۳) و (۱۴) و توابع مشخصه آنها با روابط (۱۵) و (۱۶) بیان می‌شوند [۲۸،۳۷].

$$\Delta \dot{P}_{BESS} = \frac{k_{BESS} \Delta U_{BESS}}{T_{BESS}} - \frac{\Delta P_{BESS}}{T_{BESS}} \quad (13)$$

$$\Delta \dot{P}_{FESS} = \frac{k_{FESS} \Delta U_{FESS}}{T_{FESS}} - \frac{\Delta P_{FESS}}{T_{FESS}} \quad (14)$$

$$G_{BESS}(s) = \frac{k_{BESS}}{1+sT_{BESS}} = \frac{\Delta P_{BESS}(s)}{\Delta U_{BESS}(s)} \quad (15)$$

$$G_{FESS}(s) = \frac{k_{FESS}}{1+sT_{FESS}} = \frac{\Delta P_{FESS}(s)}{\Delta U_{FESS}(s)} \quad (16)$$

در روابط (۱۳) الی (۱۶)، T_{BESS} و K_{BESS} به ترتیب بهره و ثابت زمانی سیستم باتری، T_{FESS} و K_{FESS} به ترتیب بهره و ثابت زمانی سیستم چرخ طیار، ΔP_{BESS} تغییرات توان تولید/جذب شده (مثبت/منفی) از باتری، ΔP_{FESS}

در رابطه (۶)، η : بازده سلول خورشیدی، S : مساحت سلول خورشیدی (m^2)، ϕ : شدت تابش خورشیدی (kw/m^2) و T_a : دمای محیط ($^{\circ}C$) هستند.

۲-۲-۳- دیزل ژنراتور (DEG)

دیزل ژنراتور نقش عمده‌ای در ریزشبهه هیبرید مستقل دارد؛ به طوری که هنگام افزایش بار، بخشی از تأمین توان لازم برای رسیدن به وضعیت تعادل (توان) را برعهده دارد. مدل دینامیکی دیزل ژنراتور در تحلیل سیگنال کوچک با رابطه (۷) و تابع مشخصه آن در رابطه (۸) بیان می‌شود [۱۰].

$$\Delta \dot{P}_{DEG} = \frac{k_{DEG} \Delta P_C}{T_{DEG}} - \frac{k_{DEG} \Delta F}{RT_{DEG}} - \frac{\Delta P_{DEG}}{T_{DEG}} \quad (7)$$

$$G_{DEG}(s) = \frac{k_{DEG}}{1+sT_{DEG}} = \frac{\Delta P_{DEG}(s)}{\Delta U_{DEG}(s)} \quad (8)$$

$$\Delta U_{DEG}(s) = \Delta P_C(s) - \frac{\Delta F(s)}{R}$$

در روابط (۷) و (۸)، k_{DEG} و T_{DEG} به ترتیب بهره و ثابت زمانی و سیستم دیزل ژنراتور؛ R : ضریب افتی سرعت، ΔP_{DEG} : تغییرات توان دیزل ژنراتور و ΔU_{DEG} : تغییرات سیگنال ورودی به دیزل ژنراتور، ΔP_C : تغییرات سیگنال اعمالی کنترل‌کننده به دیزل ژنراتور و ΔF : تغییرات فرکانس هستند.

۲-۲-۴- الکترولایزر (AE)

الکترولایزر، هیدروژن لازم را برای پیل سوختی فراهم می‌کند. توان الکترولایزر با بخشی از توان توربین بادی $(1-k_a)\Delta P_{WTG}$ فراهم می‌شود. مدل دینامیکی الکترولایزر در تحلیل سیگنال کوچک با رابطه (۹) و تابع مشخصه آن در رابطه (۱۰) توصیف شده است [۱۰،۳۷].

$$\Delta \dot{P}_{AE} = \frac{k_{AE}(1-k_a)\Delta P_{WTG}}{T_{AE}} - \frac{\Delta P_{AE}}{T_{AE}} \quad (9)$$

$$G_{AE}(s) = \frac{k_{AE}}{1+sT_{AE}} = \frac{\Delta P_{AE}(s)}{\Delta P_i(s)} \quad (10)$$

$$\Delta P_i(s) = (1-K_i)\Delta P_{WTG}(s), K_i = 0.6$$

در روابط (۹) و (۱۰)، k_{AE} و T_{AE} به ترتیب بهره و ثابت زمانی الکترولایزر، ΔP_{AE} : تغییرات هیدروژن تولیدی

فرکانس تغییر می‌کند. برای بازگشت فرکانس به مقدار نامی در دو سطح عمل می‌شود: کنترل اولیه و کنترل ثانویه فرکانس [۳۸].

الف - کنترل اولیه فرکانس

همان‌طور که در شکل (۲) ملاحظه می‌شود، در ریزشبهه مطالعه‌شده، کنترل اولیه فرکانس با حلقه افقی دیزل ژنراتور مطابق رابطه (۲۰) صورت می‌گیرد؛ که در آن R : ضریب افقی (pu) است.

$$\Delta f \times \frac{1}{R} = \Delta P, \Delta f = f - f_0, \Delta P = P - P_0 \quad (20)$$

ب - کنترل ثانویه

حلقه کنترلی اولیه، فرکانس افت کرده را محدود می‌کند؛ اما در برگرداندن فرکانس به مقدار نامی ناتوان است؛ بنابراین از حلقه تعاملی دیگری با نام کنترل ثانویه فرکانس استفاده می‌شود [۳۸]. با توجه به شکل (۲)، در این مقاله از کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل برای بازگرداندن فرکانس به مقدار نامی در حلقه کنترلی ثانویه استفاده شده است.

۳- کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل

۳-۱- ساختار کلی

کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل در محدوده وسیعی از کاربردها در صنایع مختلف از قبیل فرآیندهای شیمیایی، صنعت نفت و سیستم‌های الکترومکانیکی استفاده شده است [۳۰]. ساختار کلی کنترل‌کننده پیش‌بین در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۳)، در کنترل‌کننده مذکور، با استفاده از مدلی از سیستم، رفتار آینده آن، پیش‌بینی و کنترل می‌شود. در این کنترل‌کننده، با حداقل کردن یک تابع هزینه، سیگنال کنترلی به‌دست می‌آید. مقادیر سیگنال کنترلی در افق کنترل، طوری تعیین می‌شوند که خروجی سیستم در آینده بر روی افق معین، مسیر مرجع تعیین‌شده را دنبال کند. برای این منظور، باید تابع هزینه حداقل شود که عموماً به صورت مربع انحراف متغیرهای کنترل‌شونده از مقدار مطلوب و مجموع مربعات سیگنال‌های کنترلی در نظر گرفته می‌شود. رابطه (۲۱)، تابع هزینه و رابطه (۲۲) و (۲۳)

تغییرات توان تولید/جذب شده (مثبت/منفی) از چرخ طیار، ΔU_{BESS} : تغییرات سیگنال اعمالی کنترل‌کننده به سیستم باتری و ΔU_{FESS} : تغییرات سیگنال اعمالی کنترل‌کننده به سیستم چرخ طیار هستند.

۲-۲-۷- تغییرات فرکانس و توان ریزشبهه

تغییرات توان در ریزشبهه، تغییرات فرکانس را سبب می‌شود. مدل دینامیکی ریزشبهه، برای تحلیل سیگنال کوچک با رابطه (۱۷) بیان می‌شود [۳۷].

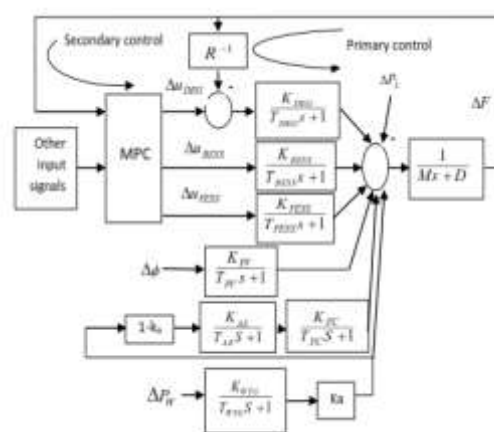
$$G_{SYS}(s) = \frac{1}{K_{SYS}(1+sT_{SYS})} = \frac{1}{Ms+D} = \frac{\Delta F(s)}{\Delta P(s)} \quad (17)$$

در رابطه (۱۷)، D : ثابت میرایی سیستم (pu)، M : ثابت اینرسی سیستم (pu)، ΔF : تغییرات فرکانس سیستم (pu) و ΔP : تغییرات توان سیستم (pu) هستند که از روابط (۱۸) و (۱۹) محاسبه می‌شوند.

$$\Delta P = \Delta P_S - \Delta P_L \quad (18)$$

$$\Delta P_S = K_t \Delta P_{WTG} + \Delta P_{PV} + \Delta P_{DEG} + \Delta P_{FC} + \Delta P_{FESS} + \Delta P_{BESS} \quad (19)$$

در روابط (۱۸) و (۱۹)، ΔP_S : تغییرات متوجه توان الکتریکی منابع ریزشبهه و ΔP_L : تغییرات بار ریزشبهه هستند که به صورت بار توان ثابت در نظر گرفته می‌شوند. شکل (۲) مدل سیگنال کوچک ریزشبهه را به صورت بلوکی از اجزاء مختلف نشان می‌دهد.



شکل (۲): مدل دینامیکی ریزشبهه

۲-۳- کنترل فرکانس

همان‌طور که در شکل (۲) ملاحظه می‌شود، در صورت رخداد اغتشاشی در ریزشبهه و به هم خوردن تعادل توان،

۳-۲- طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین

تغییر در توان تولیدی منابع و بار در ریزشبهه، تغییر در فرکانس را سبب می‌شود. منابع توان ریزشبهه به دو دسته تقسیم می‌شوند؛ الف- منابع کنترل‌پذیر: شامل دیزل ژنراتور، سیستم ذخیره باتری و چرخ طیار؛ ب- منابع کنترل‌ناپذیر شامل پیل سوختی، توربین بادی و سلول خورشیدی. در طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین، تغییرات منابع توان کنترل‌ناپذیر به صورت اغتشاش قابل پیش‌بینی و تغییرات بار به صورت اغتشاش غیرقابل پیش‌بینی در نظر گرفته می‌شوند. شکل (۵) ساختار کنترل‌کننده پیش‌بین پیشنهادی ریزشبهه و سیگنال‌های ورودی و خروجی آن را نشان می‌دهد. معادلات حالت کنترل‌کننده پیش‌بین به صورت زیر هستند.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + BU + DW \\ Y &= CX \\ X &= [\Delta F \quad \Delta P_{DEG} \quad \Delta P_{BESS} \quad \Delta P_{FESS}]^T \\ U &= [\Delta u_{DEG} \quad \Delta u_{BESS} \quad \Delta u_{FESS}]^T \\ W &= [\Delta P_{FC} + \Delta P_{WTG} + \Delta P_{PV} - \Delta P_L] \end{aligned} \quad (24)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{D}{M} & \frac{1}{M} & \frac{1}{M} & \frac{1}{M} \\ -\frac{K_{DEG}}{RT_{DEG}} & -\frac{1}{T_{DEG}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{BESS}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{FESS}} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{K_{DEG}}{T_{DEG}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{BESS}}{T_{BESS}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{FESS}}{T_{FESS}} \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{1}{M} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$C = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

در رابطه (۲۴)، X : بردار متغیرهای حالت، A : ماتریس فضای حالت، U : بردار خروجی کنترلی، B : ماتریس

به ترتیب قیودی اعمالی روی سیگنال‌های کنترلی و خروجی را نشان می‌دهند [۳۰].

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \beta(j) [y(k+j|k) - W(k+j)]^2 \quad (21)$$

$$+ \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [u(k+j-1)]^2 \quad (22)$$

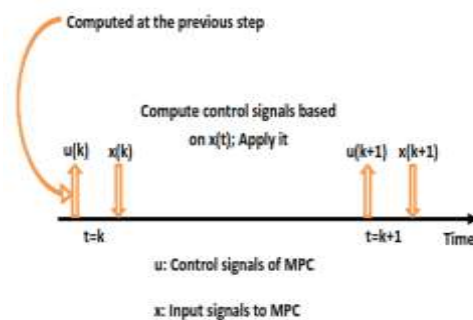
$$u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max} \quad (23)$$

$$y_{\min} \leq y(k) \leq y_{\max} \quad (23)$$

در روابط (۲۱) تا (۲۳)، $J(N_1, N_2, N_u)$: تابع هزینه‌ای است که باید حداقل شود؛ N_1 : افق پایین پیش‌بینی، N_2 : افق بالای پیش‌بینی، N_u : افق کنترل، $y(k+j|k)$: مقدار پیش‌بینی شده سیگنال خروجی در لحظه $k+j$ ، در صورتی که سیستم در لحظه k قرار داشته باشد، $W(k+j)$: خروجی مرجع در افق کنترل در لحظه $k+j$ ، $u(k+j-1)$: سیگنال کنترلی محاسبه شده برای زمان $k+j-1$ ، در صورتی که سیستم در لحظه k قرار داشته باشد، $\beta(j)$: فاکتور توزین (ضرائب وزنی خطا) و $\lambda(j)$: فاکتور توزین (ضرائب وزنی سیگنال کنترلی) هستند. شکل (۴)، ترتیب زمانی محاسبه سیگنال‌های کنترلی و نحوه محاسبه آنها را نشان می‌دهد.



شکل (۳): ساختار کلی کنترل‌کننده پیش‌بین



شکل (۴): ترتیب زمانی سیگنال‌ها در کنترل‌کننده پیش‌بین

در روابط فوق، رابطه (۲۵) تابع هدفی است که به صورت برنامه‌ریزی مربعی تنظیم شده است و با حداقل کردن آن، مجموعه سیگنال‌های کنترلی (رابطه (۳۰)) به دست می‌آیند؛ رابطه (۲۶) نحوه محاسبه سیگنال Δu_{DEG} را در هر گام زمانی بیان می‌کند. ضرایب عددی است که از حل مسئله به دست می‌آیند (با حداقل شدن J). رابطه (۲۷) حداقل و حداکثر دامنه سیگنال کنترلی اعمالی را در هر گام زمانی نشان می‌دهد. روابط (۲۸) و (۲۹) به ترتیب محدوده ضرایب انتخاب شده در تابع هدف را نشان می‌دهند. رابطه (۳۱) نحوه محاسبه متغیرهای حالت را در هر گام زمانی بیان می‌کند و رابطه (۳۲) سیگنال‌های کنترلی در نظر گرفته شده برای منابع ذخیره انرژی را نشان می‌دهد. همچنین در محاسبات صورت گرفته شاخص زیر نیز به دست می‌آید.

$$P_{index} = \int_0^T |\Delta f|^2 dt \quad (33)$$

از شاخص معرفی شده در رابطه (۳۳) برای مقایسه روش‌های کنترلی - در بخش شبیه‌سازی - استفاده می‌شود. کنترل پیش‌بین علاوه بر میرا کردن فرکانس ریزش‌بکه، باید سطح ولتاژ ریزش‌بکه را نیز با مبدل‌های منابع توان و همچنین سیستم تحریک دیزل ژنراتور، کنترل و تنظیم کند. نحوه کنترل ولتاژ در ریزش‌بکه موضوع مستقلی است و در چارچوب مقاله حاضر نیست؛ بنابراین، در ضمیمه الف به چگونگی کنترل ولتاژ در ریزش‌بکه (جدا از شبکه اصلی) به صورت خلاصه اشاره شده است.

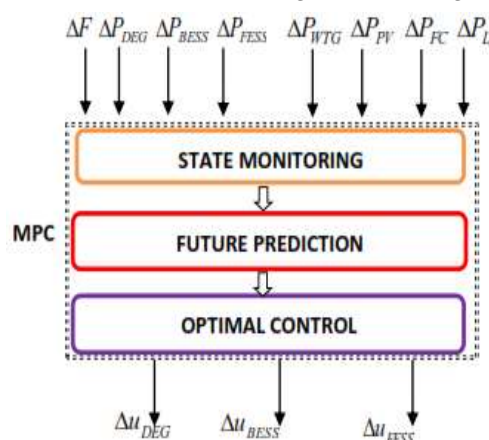
۵- شبیه‌سازی

همان‌طور که در بخش سوم بیان شد، انواع منابع انرژی تجدیدپذیر، در ریزش‌بکه شبیه‌سازی شده در نظر گرفته شده‌اند. مقادیر پارامترهای منابع انرژی تجدیدپذیر در جدول (۱) نشان داده شده‌اند [۱۰].

جدول (۱): مقادیر پارامترهای منابع انرژی ریزش‌بکه [۱۰]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
D(pu/HZ)	0.012	T _{WTG} (s)	1.5
2H(pu s)	0.1667	T _{AE} (s)	0.5
T _{FESS} (s)	0.1	K _{WTG}	1
T _{BESS} (s)	0.1	R(Hz/pu)	3
T _{FC} (s)	4	K _t	0.6
K _{FC}	1/100	K _{DEG}	1/300
K _{AE}	1/500	K _{FESS}	-1/100
K _{BESS}	-1/300	K _{PV}	1
T _{DEG} (s)	2	T _{PV}	1.8

ضرائب، W : بردار اغتشاش (ورودی کنترل‌ناپذیر) و D : ماتریس ضرایب اغتشاش هستند.



شکل (۵): ساختار کنترل‌کننده پیش‌بین پیشنهادی ریزش‌بکه

در کنترل‌کننده پیشنهادی (با توجه به شکل (۵)) در مرحله اول تغییرات منابع توان و بار و همچنین فرکانس ریزش‌بکه ارزیابی و اندازه‌گیری می‌شوند؛ سپس در مرحله بعدی، پیش‌بینی خروجی سیستم (تغییرات فرکانس) و اعمال سیگنال‌های مناسب کنترل‌کننده با توجه به قانون صورت می‌گیرند. روابط حاکم بر رفتار کنترل‌کننده با استفاده از روابط (۲۵) تا (۳۲) توصیف می‌شوند.

$$\min_{\Delta u} J = \sum_{j=N_1}^{N_2} W_j (\Delta F(k+j))^2 + \sum_{i=1}^{N_u} V_i (\Delta u_{DEG}(k+j) - \Delta u_{DEG}(k+j-1))^2 \quad (25)$$

subject to

$$\Delta u_{DEG}(k) = \Delta u_{DEG}(k-1) + \sum_{i=0}^{N_t} \delta_i \Delta F(k-i) \quad (26)$$

$$\Delta U_{\min} \leq |\Delta u_{DEG}(k) - \Delta u_{DEG}(k-1)| \leq \Delta U_{\max} \quad (27)$$

$$W_i^{\min} \leq W_j \leq W_j^{\max} \quad (28)$$

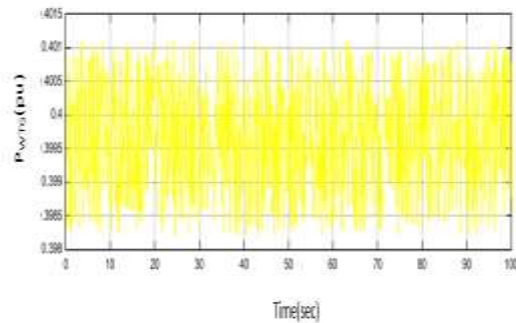
$$V_j^{\min} \leq V_j \leq V_j^{\max} \quad (29)$$

$$\Delta U = \{\Delta u_{DEG}(k), \Delta u_{DEG}(k+1), \dots, \Delta u_{DEG}(k+N_u)\} \quad (30)$$

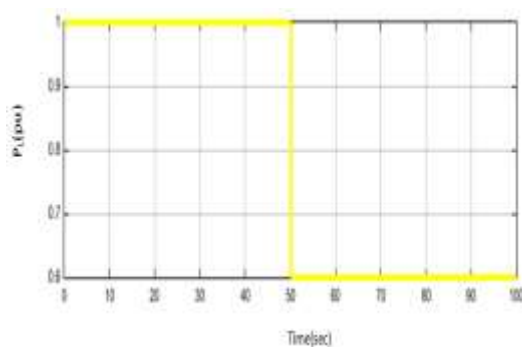
$$X(k+1) = AX(k) + BU(k) + DW(k) \quad (31)$$

$$Y(k) = CX(k)$$

$$\Delta u_{BESS} = \Delta u_{FESS} = \Delta F \quad (32)$$



شکل (۷): تغییر توان توربین بادی (pu) [۱۰]



شکل (۸): تغییرات بار ریز شبکه (pu) [۱۰]

شبیه‌سازی در ۵ سناریو بررسی شده است.

سناریو ۱: در این سناریو، عملکرد کنترل‌کننده‌های CPSO-FOPID و CPSO-PID (ضرایب و پارامترهای کنترل‌کننده‌ها از [۱۰] اخذ شده‌اند) و کنترل پیشنهادی به اغتشاش‌های شکل (۶) تا (۸) ارزیابی می‌شوند که هم‌زمان به ریز شبکه اعمال می‌شوند. عملکرد کنترل‌کننده‌ها، برای میرا کردن نوسانات فرکانس ریز شبکه، در شکل (۹) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی نسبت به دیگر کنترل‌کننده‌ها بهتر است؛ به طوری که نوسانات فرکانس، دامنه فرجهش و فروجهش کمتری دارند و در تعداد نوسانات کمتری میرا می‌شوند.

سناریو ۲: مانند سناریو ۱ است؛ اما برای ارزیابی عملکرد مقاوم کنترل‌کننده‌ها فرض شده است که پارامتر (2H) نیز می‌تواند در بازه $0.1667 \times [1 \ 1.5]$ تغییر کند [۱۰]. پاسخ کنترل‌کننده‌ها به اعمال هم‌زمان اغتشاش‌های شکل (۶) تا (۸)، در شکل (۱۰) نشان داده شده‌اند.

پارامترهای کنترل پیش‌بین نیز به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند.

$$N_1 = 0$$

$$N_2 = 5$$

$$N_u = 2$$

$$\text{وزن روی متغیرهای دستکاری شده} = 0$$

$$\text{وزن روی سرعت متغیرهای دستکاری شده} = 0.1$$

$$\text{وزن روی سیگنال خروجی} = 2 \text{ تا } 0$$

$$\text{فواصل زمانی نمونه برداری} = 0.0002 \text{ sec}$$

مقادیر حداکثر و حداقل سیگنال کنترلی $(u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max})$ مطابق زیر تنظیم می‌شوند. [۳۰].

$$\text{حداکثر مقدار سیگنال کنترلی} = 1 \text{ pu}$$

$$\text{حداقل مقدار سیگنال کنترلی} = 0.1 \text{ pu}$$

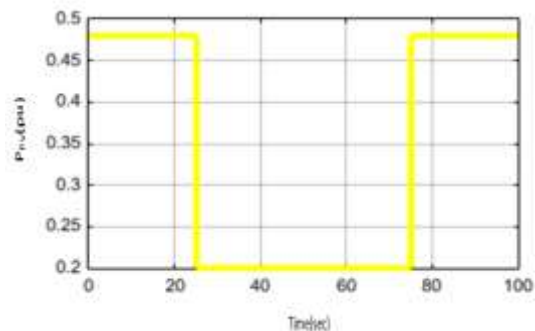
همچنین حداکثر و حداقل انحراف فرکانس (پریونیت)

به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند.

$$\text{ماکزیمم انحراف فرکانس} = 1 \text{ pu}$$

$$\text{مینیمم انحراف فرکانس} = -1 \text{ pu}$$

برای ارزیابی عملکرد روش کنترلی پیشنهادی، شبیه‌سازی در محیط متلب/سیمولینک صورت گرفته است. اغتشاشات وارده بر ریز شبکه (از نوع تغییرات ناگهانی بار و تغییرات منابع تولید پراکنده) مطابق شکل‌های (۶) تا (۸) به ریز شبکه اعمال می‌شوند. اغتشاش شکل (۶) مربوط به تغییر توان سلول خورشیدی، شکل (۷) مربوط به تغییر توان توربین بادی و اغتشاش و شکل (۸) مربوط به تغییر بار ریز شبکه هستند [۱۰].



شکل (۹): تغییر توان سلول خورشیدی (pu) [۱۰]

شدیدی مطابق شکل (۱۴) است [۲۵]. عملکرد کنترل کننده پیشنهادی و کنترل کننده‌های Fuzzy-PI و ZN-PI برای میرا کردن تغییرات فرکانس در شکل (۱۵) نشان داده شده‌اند. عملکرد کنترل کننده پیشنهادی نسبت به دیگر کنترل کننده‌ها به نحو چشمگیری در این سناریو نیز مطلوب‌تر است.

برای ارزیابی بهتر کنترل کننده پیشنهادی و کنترل کننده‌های Fuzzy-PI و ZN-PI، شاخصی مطابق رابطه (۳۳) تعریف می‌شود [۲۵]. نتایج ارزیابی کنترل کننده‌های مختلف در سناریوهای (۴) و (۵) در جدول (۲) نشان داده شده‌اند. ملاحظه می‌شود که عملکرد کنترل کننده پیشنهادی نسبت به دیگر کنترل کننده‌ها بهتر است.

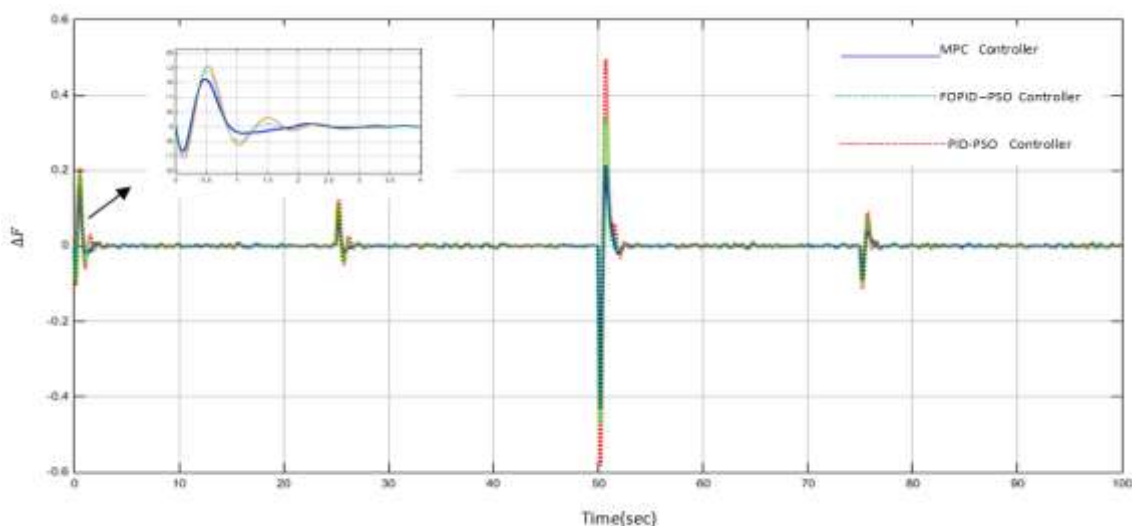
جدول (۲): عملکرد کنترل کننده‌ها بر اساس شاخص در

سناریوهای ۴ و ۵

سناریو	کنترل کننده MPC	Fuzzy-PI [25]	ZN-PI [25]
۴	+۰/۰۰۰۱۳۷۴	+۰/۰۰۰۲۰	+۰/۰۰۰۲۴
۵	+۰/۰۰۱۰۹	+۰/۰۰۲۷۲	+۰/۰۰۴۲۶

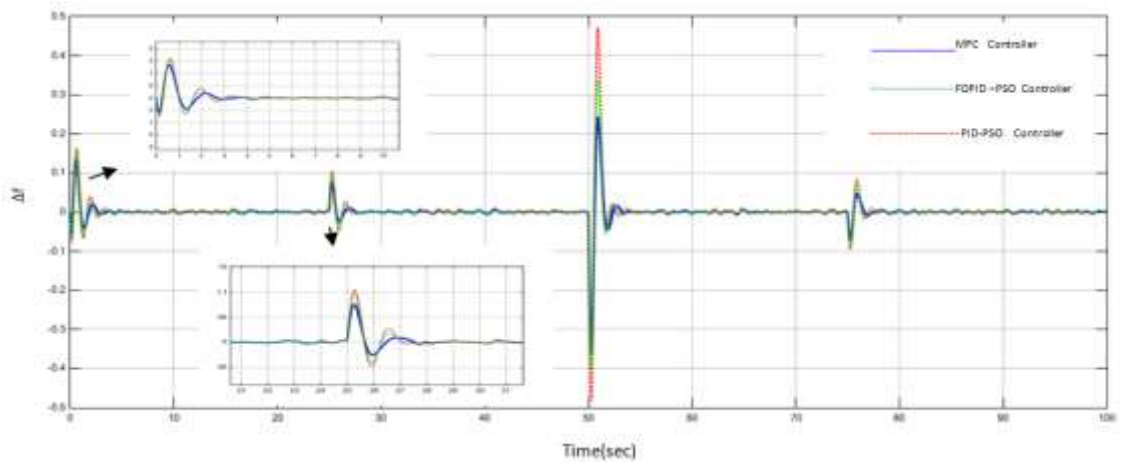
همان‌طور که ملاحظه می‌شود کنترل کننده پیشنهادی در این حالت نیز عملکرد بهتری نسبت به دیگر کنترل کننده‌ها دارد. سناریو ۳: مانند سناریو ۱ است؛ اما برای ارزیابی عملکرد مقاوم کنترل کننده‌ها فرض شده است که پارامتر (2H) نیز می‌تواند در بازه $0.1667 \times [0.5 \ 1]$ تغییر کند [۱۰]. پاسخ کنترل کننده‌ها به اعمال هم‌زمان اغتشاش‌ها در شکل (۱۱) نشان داده شده‌اند. در این حالت نیز کنترل کننده پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به دیگر کنترل کننده‌ها دارد. سناریو ۴: در این سناریو اغتشاشی بار پله‌ای مطابق شکل (۱۲) به ریزش‌بکه اعمال شده است [۲۵] برای مقایسه کردن پاسخ کنترل کننده‌های مختلف با هم، در سناریوهای (۴) و (۵) از پارامترهای منابع انرژی تجدیدپذیر ارائه شده در [۲۵] استفاده شده است. شکل (۱۳) عملکرد کنترل کننده‌های Fuzzy-PI و ZN-PI و کنترل کننده پیشنهادی را نشان می‌دهد (ضرایب و پارامترهای کنترل کننده‌های Fuzzy-PI و ZN-PI از [۲۵] اخذ شده‌اند). عملکرد کنترل کننده پیشنهادی نسبت به کنترل کننده‌های مذکور به نحو چشمگیری بهتر است.

سناریو ۵: در این سناریو، شرایط مشابه سناریو ۴ است؛ اما اغتشاش وارد بر ریزش‌بکه، اغتشاشی بار پله‌ای نسبتاً

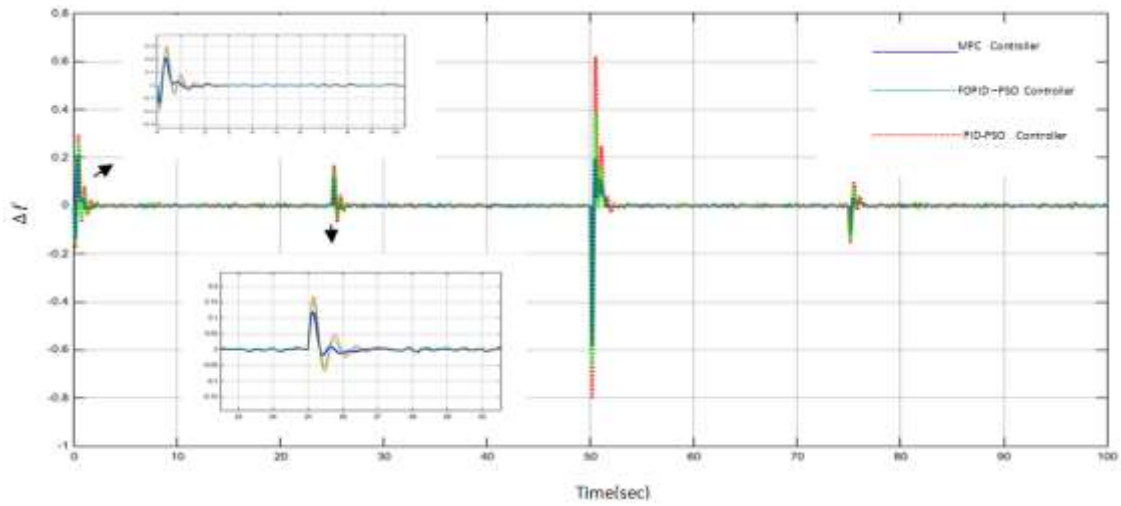


شکل (۹): عملکرد کنترل کننده‌ها برای میرا کردن تغییرات فرکانس در سناریو ۱

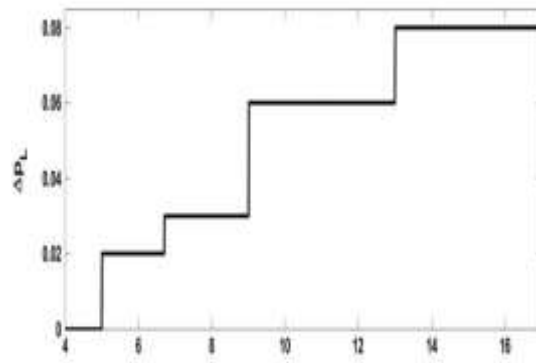
کنترل فرکانس بار در ریزشبهه جزیره‌ای با استفاده از کنترل پیش‌بین مدل



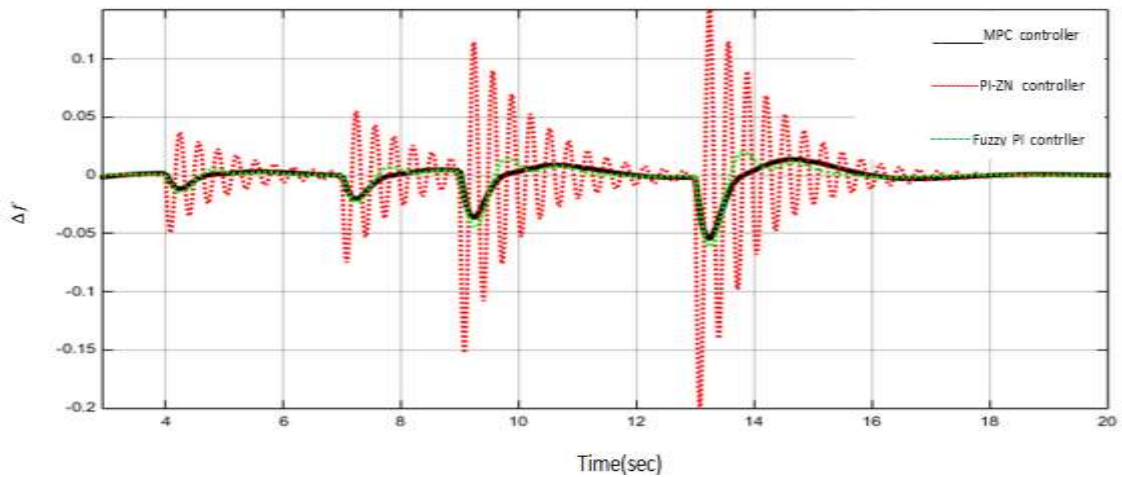
شکل (۱۰): عملکرد کنترل‌کننده‌ها برای میرا کردن تغییرات فرکانس در سناریو ۲



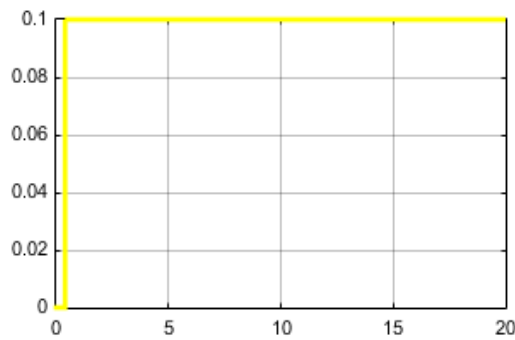
شکل (۱۱): عملکرد کنترل‌کننده‌ها برای میرا کردن تغییرات فرکانس در سناریو ۳



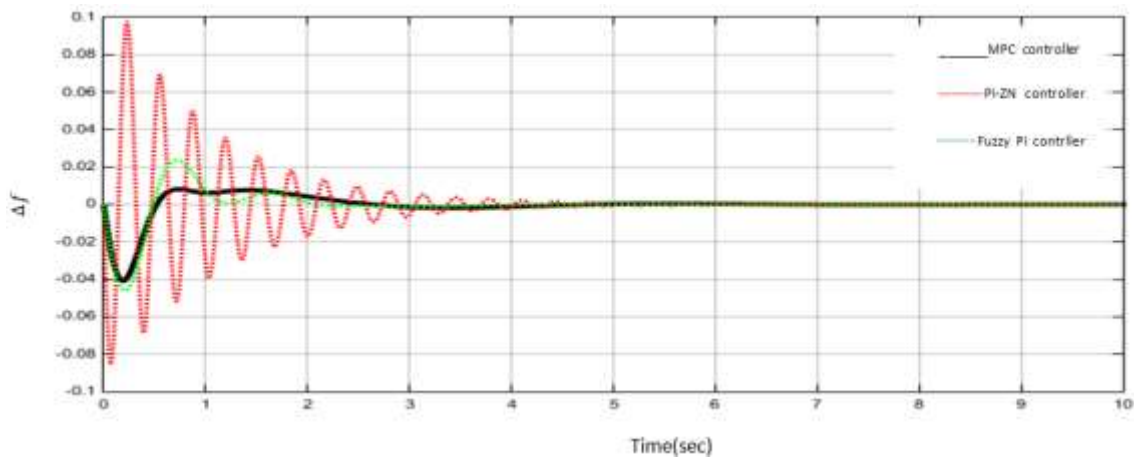
شکل (۱۲): اغتشاش بار به صورت چندپله



شکل (۱۳): عملکرد کنترل کننده‌های مختلف برای میرا کردن فرکانس در سناریو ۴



شکل (۱۴): اغتشاش بار پله‌ای نسبتاً شدید



شکل (۱۵): عملکرد کنترل کننده‌های مختلف برای میرا کردن فرکانس در سناریو ۵

۶- نتیجه گیری

یکی از موضوعات بااهمیت در کنترل ریزشکته‌های جدا از شبکه اصلی، کنترل فرکانس است. در این مقاله، روشی مقاوم مبتنی بر کنترل پیش‌بین مدل برای کنترل بار -

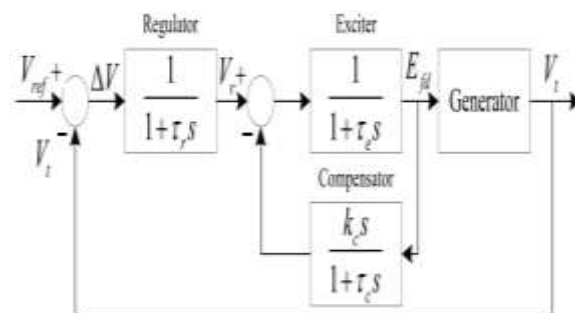
فرکانس در ریزشکته ارائه شده است. کنترل کننده پیشنهادی، سیگنال‌های کنترل را به منابع انرژی تجدیدپذیر با حلقه ثانویه کنترل اعمال می‌کند. برای بررسی کنترل پیشنهادی، ریزشکته‌ای دربردارنده انواع منابع انرژی تجدیدپذیر در

منابع توان را نشان می‌دهند [۴۲]. کنترل ولتاژ دیزل ژنراتور با تنظیم ولتاژ مرجع (V_{ref}) و کنترل مبدل با بلوک تولید سیگنال ولتاژ و فرکانس مرجع (V-F Reference Generator) صورت می‌گیرند [۴۲]. در واقع، با استفاده از سیگنال‌های کنترلی و دیگر اطلاعات موجود، سیگنال‌های ولتاژ مرجع برای دیزل ژنراتور و همچنین سیگنال ولتاژ و فرکانس مرجع برای منابع توان کنترل‌پذیر و کنترل‌ناپذیر تولید می‌شوند. شکل‌های (الف-۳) تا (الف-۵) بلوک‌های دیگر تولید سیگنال‌های مرجع را به صورت شماتیکی به ترتیب برای دیزل ژنراتور، منابع انرژی تجدیدپذیر کنترل‌پذیر، و منابع انرژی تجدیدپذیر کنترل‌ناپذیر نشان داده‌اند. مرجع، جزئیات عملکرد مبدل‌ها برای کنترل ولتاژ ریزشبهه جدا از شبکه اصلی را بررسی کرده است [۴۲].

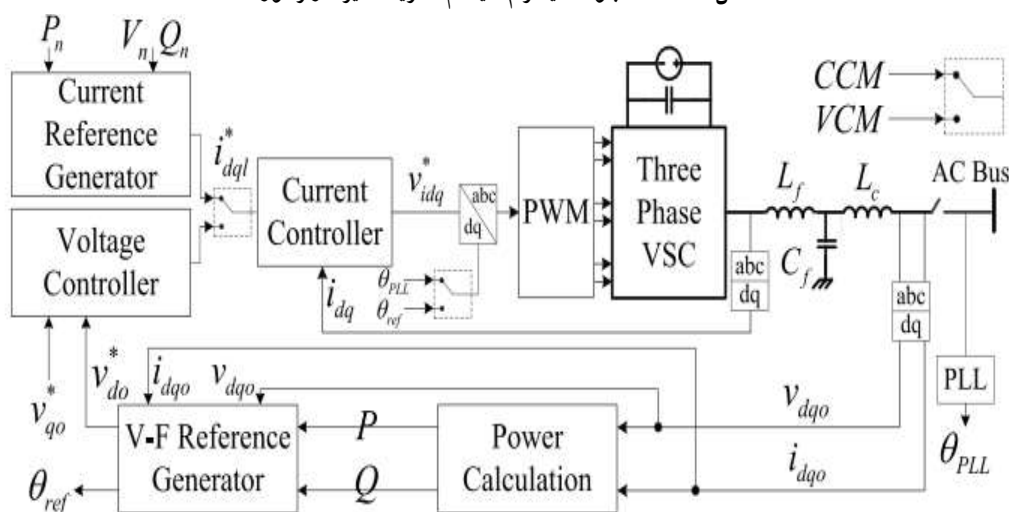
محیط متلب/سیمولینک شبیه‌سازی شده است. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با کنترل‌کننده‌هایی همچون Fuzzy-ZN-PI، PI، CPSO-FOPID و CPSO-PID، بیان‌کننده عملکرد بهتر و مطلوب‌تر کنترل‌کننده پیشنهادی برای میرا کردن نوسانات فرکانس و عملکرد مقاوم آن در مقابل عدم قطعیت و تغییرات پارامترهای ریزشبهه هستند.

ضمیمه الف

در ریزشبهه مستقل از شبکه اصلی، تغییر در سطح توان، سبب تغییر در ولتاژ و فرکانس ریزشبهه می‌شود؛ بنابراین کنترل ولتاژ و فرکانس ضروری است. کنترل ولتاژ دیزل ژنراتور از راه سیستم تحریک و کنترل منابع انرژی تجدیدپذیر ذخیره انرژی از راه مبدل‌های (DC/AC) صورت می‌گیرند. شکل (الف-۱) بلوک دیگرام سیستم تحریک دیزل ژنراتور و شکل (الف-۲) بلوک دیگرام مبدل

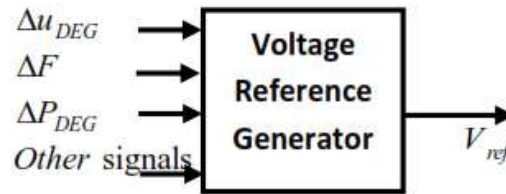


شکل (الف-۱): بلوک دیگرام سیستم تحریک دیزل ژنراتور

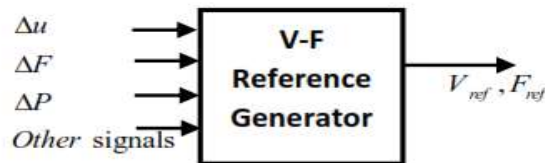


VSC: Voltage source converter; CCM: Current control mode; VCM: Voltage control mode; PLL: Phase locked loop

شکل (الف-۲): بلوک دیگرام مبدل توان منابع



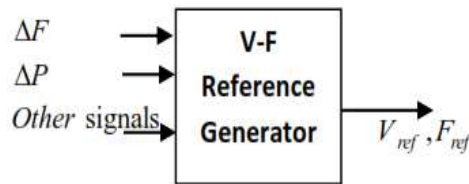
شکل (الف-۳): بلوک دیاگرام تولید ولتاژ مرجع دیزل ژنراتور



For BESS: $\Delta u = \Delta U_{BESS}, \Delta P = \Delta P_{BESS}$

For FESS: $\Delta u = \Delta U_{FESS}, \Delta P = \Delta P_{FESS}$

شکل (الف-۴): بلوک دیاگرام تولید ولتاژ مرجع برای مبدل منابع توان کنترل پذیر



شکل (الف-۵): بلوک دیاگرام تولید ولتاژ مرجع برای مبدل منابع توان کنترل ناپذیر

- generation systems for microgrid applications”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 44, pp. 751-766, 2015.
- [7] R. Dhanalakshmi, S. Palaniswami, “Load frequency control of wind diesel hydro hybrid power system using conventional PI controller”, *European J. Scient. Res.*, Vol. 60, No. 4, pp. 630-641, 2011.
- [8] P.K. Ray, S.R. Mohanty, N. Kishor, “Proportional-integral controller based small-signal analysis of hybrid distributed generation systems”, *Energy Conver. Manage.*, Vol. 52, No. 4, pp. 1943-1954, 2011.
- [9] G. Malleshham, S. Mishra, S. Member, A.N. Jha, “Ziegler-Nichols based controller parameters tuning for load frequency control in a microgrid”, *International Conference on Energy, Automation, and Signal*, Odisha, pp. 1-8, 28-30 Dec. 2011,
- [10] I. Pan, S. Das, “Fractional order AGC for distributed energy resources using robust optimization”, *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 7, No. 5, pp. 2175-2186, Sept. 2015.
- [11] K. Masui and T. Namerikawa, “Load frequency control of a microgrid based on H_∞ control considering response speed of generators”, 54th

مراجع

- [1] Fereidoon P. Sioshansi, “Distributed generation and its implications for the utility industry”, Academic Press, 2014.
- [2] F. Habibi, A. H. Naghshbandy, H. Bevrani, “Robust voltage controller design for an isolated microgrid using Kharitonov’s theorem and D-stability concept”, *Int. J. of Electrical Power & Energy System*, Vol. 44, No. 1, pp. 656-665, Jan. 2013.
- [3] S.K. Pandey, S.R. Mohanty and N. Kishor, “A literature survey on load-frequency control for conventional and distribution generation power systems”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 25, pp. 318-334, 2013.
- [4] C. Chowdhury, S. P. Chowdhury, and P. Crossley, “Microgrids and Active Distribution Networks”, the Institution of Engineering and Technology”, London, 2009.
- [5] A.R. Teel, A. Subbaraman, A. Sferlazza, “Stability analysis for stochastic hybrid systems: A survey”, *Automatica*, Vol. 50, pp. 2435-2456, 2014.
- [6] A.M. Bouzid, J.M. Guerrero, A. Cheriti, et al., “A survey on control of electric power distributed

- [24] G. Shankar, V. Mukherjee, "Load frequency control of an autonomous hybrid power system by quasi-oppositional harmony search algorithm", *Int J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 78, pp. 715–734, 2016.
- [25] H. Bevrani, F. Habibi, P. Babahajyani, M. Watanabe and Y. Mitani, "Intelligent frequency control in an ac microgrid: online pso-based fuzzy tuning approach", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 3, No. 4, pp. 1935-1944, Dec. 2012.
- [26] M. H. Khooban, T. Niknam, F. Blaabjerg, P. Davari, and T. Dragicevic, "A robust adaptive load frequency control for micro-grids." *ISA Transactions*, Vol. 65, pp. 220-229, 2016.
- [27] M. H. Khooban, T. Niknam, F. Blaabjerg, P. Davari, and T. Dragicevic, "A new load frequency control strategy for micro-grids with considering electrical vehicles", *Electric Power Systems Research*, Vol. 143, pp. 585-598, 2017.
- [28] P. F. Frack, E. Pedro, E.H. Watanabe, R. W. Doncker and S. Hanno, "Control strategy design for frequency control in autoumous smart microgrids", *Proceedings of the 5th IEEE International Symposium on power Electronics for Distributed Generation Systems*, pp. 1-8. 2014.
- [29] F. S. Tidjani, A. Hamadi, A. Chandra, P. Pillay and A. Ndtoungou, "Optimization of standalone microgrid considering active damping technique and smart power management using fuzzy logic supervisor", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 8, No. 1, pp. 475-484, Jan. 2017.
- [30] EF. Camacho, CB. Alba, "Model predictive control", *Springer Science & Business Media*; 2013.
- [31] A. Parisio, E. Rikos, G. Tzamalis, L. Glielmo, "Use of model predictive control for experimental microgrid optimization", *Applied Energy*. Vol. 115, pp. 37-46, 2014.
- [32] A. K. Verma, H. B. Gooi, A. Ukil, N. R. Tummuru and S. K. Kollimalla, "Microgrid frequency stabilization using model predictive controller, "2016 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition-Latin America (PES T&D-LA), Morelia, pp. 1-6, 2016.
- [33] S. Raimondi Cominesi, M. Farina, L. Giulioni, B. Picasso and R. Scatolini, "A two-layer stochastic model predictive control scheme for microgrids", to be appeared in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, DOI: 10.1109/TCST.2017.2657606.
- [34] J. Pahasa and I. Ngamroo, "PHEVs bidirectional charging/discharging and soc control for microgrid frequency stabilization using multiple mpc", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 6, No. 2, pp. 526-533, March 2015.
- [35] J. Pahasa and I. Ngamroo, "Coordinated Control of Wind Turbine Blade Pitch Angle and PHEVs Using MPCs for Load Frequency Control of Microgrid", *IEEE Systems Journal*, Vol. 10, No. 1, pp. 97-105, March 2016.
- [36] J. Pecos Lopes, A. Moreira, and A. G. Madureira, "Defining control strategies for microgrids islanded operation", *IEEE Trans. on power Systems*, Vol. 21, No. 2, pp. 919-920, May 2006.
- IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Osaka, pp. 5895-5902, 2015.
- [12] Singh, V.P., Mohanty, S.R., Kishor, N., Ray, P.K., "Robust H-infinity load frequency control in hybrid distributed generation system", *Int J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 46, pp. 294-305, 2013.
- [13] S. M. Azizi and S. A. Khajehoddin, "Robust load frequency control in islanded microgrid systems using μ -synthesis and D-K iteration, 2016 Annual IEEE Systems Conference (SysCon), Orlando, FL, pp. 1-8, 2016.
- [14] X. Huang, Z. Wang, J. Jiang, "Control and load-dispatching strategies for a microgrid with a DC/AC inverter of fixed frequency", *Electrical power and Energy Systems*, Vol. 43, pp. 1127-1136, 2012.
- [15] Q. Shafiee, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "Distributed Secondary control for Islanded Microgrid – A novel approach", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 2, pp. 1018-1031. 2014.
- [16] A. Elrayyah; F. Cingoz; Y. Sozer, "Smart Loads Management Using Droop-Based Control in Integrated Microgrid Systems", to be appeared in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, DOI: 10.1109/JESTPE.2017.2666786.
- [17] F. Cingoz, A. Elrayyah and Y. Sozer, "Plug-and-Play nonlinear droop construction scheme to optimize islanded microgrid operations", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 32, No. 4, pp. 2743-2756, April 2017.
- [18] R. Rana; M. Singh; S. Mishra, "Design of modified droop controller for frequency support in microgrid using fleet of electric vehicles", to be appeared in *IEEE Transactions on Power Systems*, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2651906.
- [19] C. Mu, Y. Tang and H. He, "Observer-based sliding mode frequency control for micro-grid with photovoltaic energy integration", 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Boston, pp. 1-5, 2016.
- [20] D.C. Das, A.K. Roy, N. Sinha, "GA based frequency controller for solar thermal–diesel–wind hybrid energy generation/energy storage system", *Int J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 43, No. 1, pp. 262–279, 2012.
- [21] S.K. Pandey, S.R. Mohanty, N. Kishor, J.P.S. Catalão, "Frequency regulation in hybrid power systems using particle swarm optimization and linear matrix inequalities based robust controller design", *Int J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 63, pp. 887–900, 2014.
- [22] A. A. El-Fergany and M. A. El-Hameed, "Efficient frequency controllers for autonomous two-area hybrid microgrid system using social-spider optimiser", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 11, No. 3, pp. 637-648, 2017.
- [23] R.H. Kumar, S. Ushakumari, "Biogeography-based Tuning of PID controllers for load frequency control in microgrid", 2014 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies [ICCPCT], Nagercoil, pp. 797-802, 2014.

- system used in micro-grid”, *Power Electronics*, Vol. 4, No. 19, pp. 45-47, 2012.
- [41] N. Ghaffarzadeh, A. Salimi, “A new control method of photovoltaic-battery hybrid system connected to the electrical network by using model predictive controller”, *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 29-40, 2016.
- [42] M. Farrokhabadi, C. A. Cañizares and K. Bhattacharya, “Frequency Control in Isolated/Islanded Microgrids Through Voltage Regulation”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 8, No. 3, pp. 1185-1194, May 2017.
- [37] D. J. Lee and L. Wang, “Small-signal stability analysis of an autonomous hybrid renewable energy power generation/energy storage system part I: time-domain simulations”, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 23, No. 1, pp. 311-320, Mar. 2008.
- [38] H. Bevrani, “Robust power System Frequency Control”, Springer, 2009.
- [39] T. Senjyu, T. Nakaji, K. Uezato, and T. Funabashi, “A hybrid power system using alternative energy facilities in isolated island”, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 20, No. 2, pp. 406-414, Jun. 2005.
- [40] M. K. Hao, F. Liu, X. Zhang, and C. Z. Yu, “Study on control strategy of energy storage

¹ Load frequency control (LFC)

² Proportional Integral (PI)

³ Proportional Integral differential (PID)

⁴ Robust control using μ -synthesis and D-K iteration

⁵ Genetic Algorithm (GA)

⁶ Particle Swarm Optimization (PSO)

⁷ Social-spider optimizer (SSO)

⁸ Biogeography-based optimization (BBO)

⁹ Model predictive control (MPC)

¹⁰ Zigler-Nicoles based PI (ZN-PI)

¹¹ Fuzzy based PI (Fuzzy-PI)

¹² Canonical based Fractional order PID (CPSO-FOPID)

¹³ Canonical PSO based PID (CPSO-PID)

¹⁴ Photo voltaic (PV)

¹⁵ Diesel Engine Generator (DEG)

¹⁶ Wind Turbine Generator (WTG)

¹⁷ Fuel Cell (FC)

¹⁸ Battery energy storage system (BESS)

¹⁹ Flywheel energy storage system (FESS)

²⁰ Aqua electrolyzer (AE)

