

# طراحی کنترل کننده غیرخطی در نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای دور متغیر جهت بهبود قابلیت گذر از خطا در مد موتوری

محسن علیزاده بیدگلی<sup>۱</sup>، سید محمد تقی بطحایی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی برق، گروه قدرت، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، m.alizadeh.b@ee.kntu.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی برق، گروه قدرت، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، bathaee@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۳/۱۰/۲۳، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۴/۲/۱۶)

**چکیده:** در این مقاله یک کنترل کننده غیرخطی برای یک نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای دور متغیر مبتنی بر ماشین القایی از دوسو تغذیه در مد موتوری ارائه می‌شود. کنترل کننده اصلی در این نوع نیروگاه‌ها شامل سه بخش می‌باشد که عبارتند از: کنترل کننده سمت موتور، کنترل کننده سمت شبکه و کنترل کننده پمپ-توربین. کنترل کننده‌های سمت موتور و شبکه در این مقاله بر اساس روش برداری طراحی می‌شوند. وجود مبدل‌های الکترونیک قدرت در نیروگاه‌های دور متغیر قابلیت گذر از خطای یک نیروگاه را تحت تاثیر قرار می‌دهند. بنابراین، نیروگاه‌های دور متغیر مجهز به مبدل پشت به پشت در کاربردهای صنعتی، توسط تجهیزات حفاظتی مثل کربار یا ترمز لینک مستقیم تجهیز می‌شوند تا اتصال ماشین به شبکه در طول خطا حفظ شود. اما در این مقاله یک سیگنال ورودی کمکی جدید مبتنی بر تئوری لیاپانوف طراحی می‌شود که به ولتاژ محور  $d$  از کنترل کننده برداری کلاسیک از مبدل سمت موتور اضافه می‌شود. نتایج شبیه سازی ارائه شده برای واحد توسط سیمولینک در زمان واقعی نشان می‌دهد، که سیگنال کمکی غیرخطی اضافه شده به کنترل کننده کلاسیک نه تنها نیاز موتور به ادوات حفاظتی قدیمی را برطرف می‌کند، بلکه پاسخ گذرای موتور را نیز تا حدودی بهبود می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** ایستادگی در برابر خطا، کنترل برداری، کنترل غیرخطی، موتور القایی از دوسو تغذیه، نیروگاه تلمبه ذخیره ای دور

متغیر.

## A Nonlinear Control Design for Variable Speed Pumped Storage Power Plants in order to Improve Fault Ride-Through Capability in Motor Mode

Mohsen Alizadeh Bidgoli, Seyed Mohammad Taghi Bathaee

**Abstract:** In this article, a nonlinear controller is designed for a pumped storage hydropower (PSH) based on doubly fed induction machine (DFIM) in the motor mode. The main controller of a variable speed PSH consists of three separate parts: motor side converter, grid side converter and pump-turbine guide vanes which are designed via stator voltage oriented vector control. Using the power electronics in DFIM-based application can be made the fault ride through issues. In industrial applications, the variable speed PSH uses a hardware protection, i.e. crowbar or dc link brake chopper, in order to maintain the connectivity to the grid during a fault. In this article, however, the motor side controller is modified by an effective input signal to be added to decoupled d-axis inner loop. It is shown that the proposed controller not only eliminates the need of conventional protection, but also improves the transient responses. Furthermore, it is demonstrated using real-time simulation in Matlab/Simulink that the credibility of the proposed controller.

**Keywords:** Fault ride through, vector control, nonlinear control, doubly fed induction motor, Variable speed pumped storage power plant.

## ۱- مقدمه

نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای در جهان برای ذخیره‌سازی انرژی جزء بالغ‌ترین روش‌ها می‌باشند و یا حتی می‌توان گفت، تنها روش صنعتی با ظرفیت بالا هستند که در کشورهای با شبکه قدرت به هم پیوسته بزرگ حداقل یک مورد از آن یافت می‌شود. با این حال هنوز هم مقالات زیادی در مورد سیاست‌گذاری این نوع ذخیره‌سازی در کشورهای بزرگ یافت می‌شوند [۱-۲]. همچنین یکی از مباحث مهم دیگر در شبکه‌های بزرگ استفاده از نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای در کنار انرژی-های تجدیدپذیر می‌باشد که می‌تواند محاسن زیادی را به همراه داشته باشد [۳]. با بررسی دقیق‌تر در مقالات چاپ شده می‌توان به وضوح دید که کارهای انجام شده در زمینه نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای به صورت کلی و با دید مدیریت انرژی در شبکه قدرت و یا ظرفیت نصب برای ذخیره‌سازی می‌باشند که از اهداف این مقاله به دور می‌باشد. امروزه، نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای دور متغیر مبتنی بر ماشین القایی از دوسو تغذیه (DFIM) در مد موتوری می‌توانند با تغییر دور، توان مصرفی موتور را تغییر داده و در کنترل فرکانس شبکه مشارکت کنند. لذا این نوع نیروگاه‌ها جایگاه ویژه‌ای را در کشورهای مختلف پیدا کرده‌اند که در این مقاله عملکرد آن‌ها در شرایط خطا برای مد موتوری مورد بحث قرار گرفته می‌شود.

بر اساس کدهای شبکه در هر کشور، نیروگاه‌های مختلف باید قابلیت گذر از خطا (FRT) را برای مدت زمان معین در خطای مشخص داشته باشند. واحدهایی که به ماشین القایی از دوسو تغذیه (DFIM) مجهز هستند نسبت به ماشین‌های سنکرون دارای رفتاری متفاوت در حین خطا می‌باشند. بررسی رفتار نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای دور ثابت مبتنی بر ماشین‌های سنکرون در شرایط خطا نشان می‌دهد، پایداری زاویه‌ای و تنظیم ولتاژ بعد از رفع خطا دو مشکل اساسی در نیروگاه‌های با این نوع ماشین می‌باشند [۴]. در حالیکه در نیروگاه‌های با DFIM، اضافه جریان در سیم پیچ‌های روتور و استاتور و همچنین اضافه ولتاژ لینک DC بین دو مبدل به عنوان مشکلات اصلی این نوع نیروگاه‌ها شناخته شده‌اند [۵-۶]. شایان توجه است که تاکنون مقالات زیادی در زمینه نیروگاه‌های دور متغیر از نوع ماشین‌های DFIM برای توربین بادی در مد ژنراتوری به منظور بهبود قابلیت گذر از خطا چاپ شده است، ولی نوآوری این مقاله طراحی یک کنترل کننده برداری بهبود یافته برای نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای در مد موتوری می‌باشد که تاکنون در مد ژنراتوری و برای توربین‌های بادی ارایه نشده است. در ادامه با معرفی روش‌های موجود در توربین‌های بادی که به منظور بهبود قابلیت گذر از خطا در ماشین‌های DFIM پیشنهاد شده‌اند، روش ارایه شده در این مقاله معرفی می‌شود.

راه‌حل‌های پیشنهادی مقالات برای بهبود قابلیت گذر از خطای ماشین‌های DFIM در مد ژنراتوری را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد که روش ارایه شده در این مقاله در دسته سوم است.

۱- راه حل اول استفاده از تجهیزات سخت‌افزاری است که با اتصال به سیستم در حین خطا بتواند از اضافه ولتاژ و اضافه جریان جلوگیری شود. با فعال شدن کروبار (crowbar) که در توربین‌های بادی صنعتی بسیار رایج است، سیم پیچ‌های روتور ماشین اتصال کوتاه شده و DFIM در حین خطا به ماشین القایی قفسه سنجایی تبدیل می‌شود. لذا در حین خطا ماشین توان راکتیو مغناطیس‌کنندگی خود را به جای روتور، از استاتور و از شبکه دریافت خواهد کرد، که این امر در ناپایداری حالت گذرای ماشین تاثیر به سزایی دارد [۷]. روش ترمز لینک مستقیم (DC-link brake chopper) روش دیگری است که در حین خطا برای هدر دادن انرژی اضافی لینک DC یک مقاومت توسط یک سوئیچ به دو سر خازن‌های لینک واسط موازی می‌شود [۸]. این روش در نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای صنعتی نیز به کار گرفته می‌شود [۹]. روش‌های دیگری که در مقالات پیشنهاد شده‌اند عبارتند از: استفاده از منبع ولتاژ سری [۱۰-۱۱]، استفاده از مقاومت سری با استاتور و یا روتور [۱۲].

۲- در برخی از مقالات می‌توان روش‌هایی را پیدا کرد که توسط سیستم کنترلی جدید برای مبدل سمت شبکه قابلیت گذر از خطای واحد را بهبود می‌دهند. در این مقالات سیستم کنترلی مبدل سمت شبکه می‌تواند در حین خطا، مقادیر مرجع جدید داشته باشد تا بتواند ولتاژ لینک DC را در مقدار نامی خود حفظ کند [۱۳-۱۴].

۳- از آنجاییکه علت اصلی اضافه جریان و اضافه ولتاژ بوجود آمده در شرایط خطا، ولتاژ القایی روی سیم پیچ‌های روتور در حین خطا می‌باشد [۱۵]، برخی از مقالات توسط کنترل مبدل سمت ماشین و ولتاژ اعمالی به روتور و بدون استفاده از تجهیزات سخت‌افزاری قابلیت گذر از خطای ماشین را افزایش می‌دهند.

از آنجاییکه نوآوری این مقاله ارایه روشی جدید در دسته سوم از مطالب گفته شده است، مقالات موجود در این زمینه در ادامه با دقت بیشتری بررسی می‌شود. برای اولین بار ایده استفاده از جبران‌سازی ولتاژ القایی روی سیم پیچ روتور به همراه مقاومت پسخور در سال ۲۰۰۵ با بررسی پایداری آن ارایه شد [۱۶]. در سال ۲۰۰۶ روشی دیگر مبتنی بر ایده قبلی برای حذف کروبار و گذر از خطا ارایه شد [۱۷]. در این روش با تخمین شار استاتور و اندازه‌گیری مولفه‌های DC و منفی، ولتاژ روتور به منظور جبران این مولفه‌ها توسط مبدل سمت ماشین تعیین می‌شود. این روش در سال ۲۰۱۱ با اضافه شدن سیگنال کنترل توان راکتیو و مقاومت فعال بهبود داده شده است [۱۸]. اگر چه این دو روش می‌توانند بدون استفاده از کروبار ولتاژ لینک DC را محدود و مبدل سمت موتور را از اضافه جریان‌های غیر مجاز مصون دارند، ولی تخمین صحیح مولفه شار و ریپل زیاد گشتاور ایجاد شده به دلیل وجود مولفه‌های غیر مثبت در آن کارایی این نوع روش‌ها را در حالت عملی به شدت کاهش می‌دهند. در [۱۹] به جای کنترل کننده تناسبی-انتگرالی (PI) در حلقه داخلی از تنظیم کننده مبتنی بر هیستریزس بهبود یافته استفاده شده است. در این روش مقدار جریان مرجع بر اساس کد شبکه و مقدار اکتیو و راکتیو در حین

هد خالص سیستم که از مجموع بین هد اصطکاک و هد استاتیکی بدست می‌آید را با دبی خروجی پمپ نشان می‌دهد [۲۳].

$$\dot{Q}_p = (H'_s - H_p) / T_w \quad (1)$$

$$H_p = a_2 Q_p^2 + a_1 \omega_r |Q_p| + a_0 \omega_r \quad (2)$$

$$H'_s = H_s + (f_e + f_g) Q_p^2 \quad (3)$$

که  $T_w$  زمان شروع آب و ضرایب  $f_e$  و  $f_g$  به ترتیب ضرایب اصطکاک تلفات هد و تلفات در اثر بستن دریچه ورودی هستند. همچنین ضرایب  $a_0$ ،  $a_1$  و  $a_2$  ضرایب ثابتی هستند که در پیوست ۱ آورده شده و بسته به نوع پمپ متفاوت بوده و برای تعیین منحنی پمپ به کار برده می‌شوند [۲۳]. در انتها می‌توان توان مکانیکی مصرف شده توسط پمپ را توسط (۴) نشان داد.

$$P_m = \frac{P_p}{\eta_p} H_p Q_p \quad (4)$$

که  $\eta_p$  بازدهی پمپ و  $\eta_p$  یک ضریب ثابت برای تبدیل مبنای پمپ به موتور است که به صورت (۵) تعریف می‌شود.

$$P_{np} = \frac{P_{np} (MW)}{S_{nm} (MVA)} \quad (5)$$

که  $P_{np}$  توان نامی توربین  $S_{nm}$  توان ظاهری نامی ماشین در مد موتوری است.

#### ماشین القایی از دو سو تغذیه: در مدل‌های موجود در مراجع، با

صرف نظر از دینامیک شار استاتور و در نظر گرفتن ولتاژ استاتور بر روی محور  $d$ ، می‌توان به مدل مرتبه سوم از یک ماشین القایی از دو سو تغذیه دست یافت. در این مدل جریان‌های روتور در محور  $dq$  به عنوان دو متغیر حالت با دینامیکی مطابق رابطه (۶) در نظر گرفته می‌شود [۶].

$$\frac{L'_r}{\omega_b} \frac{di_{dr}}{dt} = -R_r i_{dr} + s \frac{L_m}{L_s} \varphi_{qs} + s L'_r i_{qr} + v_{dr} \quad (6)$$

$$\frac{L'_r}{\omega_b} \frac{di_{qr}}{dt} = -R_r i_{qr} - s L'_r i_{dr} + v_{qr}$$

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{2H} (T_e - T_m)$$

که  $L'_r$  اندوکتانس حالت گذرا در سیم پیچ روتور است که به صورت  $L'_r = L_r - L_m^2 / L_s$  تعریف می‌شود.

از طرفی می‌توان روابط حاکم بر توان‌های اکتیو و راکتیو در مد موتوری را به صورت زیر نوشت.

$$P_e = \omega_r \varphi_s i_{qr} L_m / L_s \quad (7)$$

$$Q_s = (v_{qs}^2 - L_m v_{qs} i_{dr}) / L_s \quad (8)$$

مشخص است که توان اکتیو در این روش به جریان محور  $q$  وابسته است که این جریان نیز از طریق  $v_{qr}$  قابل کنترل است. همچنین توان

خطا و بر اساس سناریوهای متفاوت تعیین می‌شود. روش دیگری نیز توسط [۲۰-۲۱] مبتنی بر کنترل کننده برداری کلاسیک و با تغییر مقدار گشتاور مرجع در حین خطا پیشنهاد شده است. در این روش با صفر کردن مقدار گشتاور مرجع، انرژی مکانیکی وارد شده به ماشین به جای تلف شدن در کربوراب موجب افزایش سرعت توربین می‌شود. همچنین در [۲۲] برای گذر از خطا پیشنهاد شده است تا با استفاده از حداکثر ظرفیت مبدل برای تولید ولتاژ در حین خطا بتوان شار روتور در حین خطا را جبران کرده و از ایجاد اضافه ولتاژ لینک dc و اضافه جریان در سیم‌پیچ‌های ماشین جلوگیری کرد.

با این حال، روش پیشنهادی در این مقاله بر پایه کنترل برداری کلاسیک بنا نهاده شده که با اضافه شدن یک سیگنال کمکی غیرخطی در محور  $d$  از مبدل سمت موتور می‌تواند قابلیت گذر از خطای موتور را بهبود دهد. همچنین در این روش دو نوآوری قابل توجه را نسبت به روش‌های معرفی شده در توربین بادی می‌توان ذکر کرد. ۱- روش پیشنهادی در مقایسه با روش پیشنهادی مشابه در [۱۵] دارای این حسن است که سیستم تعریف شده در این مقاله از مدل کاهش یافته برای سیگنال کمکی بهره می‌گیرد که نسبت به مدل کامل پیشنهاد شده در [۱۵]، ساده‌تر و قابل پیاده سازی‌تر است. ۲- روش یاد شده در این مقاله برای افزایش قابلیت گذر از خطا در مد موتوری از نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای دور متغیر طراحی شده است که به نوبه خود برای اولین بار انجام شده است.

بر این اساس ادامه مقاله به صورت زیر ارائه می‌شود. در بخش دوم، مدلسازی اجزا مختلف ارائه می‌شود. در بخش سوم، طراحی کنترل کننده برداری کلاسیک برای مبدل سمت موتور و مبدل سمت شبکه ارائه می‌شود. همچنین در این بخش کنترل کننده پمپ نیز بیان می‌شود. در بخش ۴ سیگنال کمکی غیرخطی طراحی می‌شود. در بخش ۵ نتایج شبیه‌سازی برای یک نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای با ظرفیت ۳۸۰ مگاوات آمپر داده می‌شود. در نهایت در بخش ۶، نتیجه‌گیری و پیشنهادها آورده شده است.

## ۲- مدلسازی اجزا مختلف

در این بخش مدل ریاضی قسمت‌های مختلف هیدرولیکی و الکتریکی برای طراحی کنترل کننده واحد دور متغیر بیان می‌شود.

### تجهیزهای هیدرولیکی: تجهیزات اصلی غیر الکتریکی به کار

رفته در یک نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای را می‌توان سطوح بالا و پایین دست، مخزن فشار شکن، لوله‌های عبور آب (پنستاک) و پمپ-توربین را نام برد. شایان ذکر است که مدلسازی سیستم هیدرولیکی به منظور شبیه‌سازی سیستم آورده می‌شود و سیگنال کمکی ارائه شده در این مقاله به این مدلسازی وابسته نیست.

نقطه کار یک پمپ همیشه از تلاقی منحنی مشخصه سیستمی که در آن نصب شده و منحنی مشخصه خود پمپ بدست می‌آید. رابطه (۲) رابطه حاکم بر یک پمپ براساس سرعت، دبی آب خروجی پمپ و هد خالص بین پمپ و سطح بالادستی می‌باشد. همچنین رابطه (۳) رابطه بین

لازم به یادآوری است که طراحی کنترل کننده پیشنهادی در این مقاله شامل دو قسمت می‌باشد. ۱- قسمت اول طراحی کنترل کننده برداری کلاسیک و تنظیم ضرایب پارامترهای کنترلی است که در این بخش آورده شده است. ۲- قسمت دوم که نوآوری اصلی مقاله نیز می‌باشد شامل طراحی سیگنال کمکی غیرخطی برای بهبود کنترل کننده برداری کلاسیک در گذر از خطا می‌باشد. این قسمت در بخش ۴ آورده می‌شود.

در مد موتوری باز شدن درپچه ورودی بر اساس حداکثر بازدهی پمپ تعیین می‌شود. مبدل سمت موتور، کنترل توان تولیدی توسط واحد (مشارکت در کنترل فرکانس شبکه) و همچنین ولتاژ استاتور (کنترل توان راکتیو) را بر عهده دارد. کنترل کننده مبدل سمت شبکه نیز دارای وظایف کنترل ولتاژ خازن لینک مستقیم و توان راکتیو مبادله شده از این مبدل را بر عهده دارد.

### ۳-۱- کنترل کننده مبدل سمت موتور

بر اساس روابط (۷) و (۸) می‌توان گفت برای کنترل توان اکتیو و راکتیو توسط ولتاژهای محور  $dq$  از مبدل سمت موتور، دو حلقه کنترلی پشت سرهم استفاده می‌شود. حلقه اول یا حلقه داخلی، حلقه کنترل جریان‌های روتور در محور  $dq$  می‌باشد که ورودی آن‌ها جریان روتور مرجع و خروجی آن ولتاژ روتور می‌باشد. معمولاً در مراجع از این حلقه با نام حلقه سریع نامیده می‌شود. حلقه کنترلی دوم یا خارجی که حلقه کند نامیده می‌شود دارای ورودی توان اکتیو/توان راکتیو (ولتاژ استاتور) و خروجی آن جریان روتور مرجع می‌باشد.

$$v_{dr}^* = k_{pr} (i_{dr}^* - i_{dr}) + k_{icr} \int (i_{dr}^* - i_{dr}) - sL_r' i_{qr} - s \frac{L_m}{L_s} \varphi_s \quad (10)$$

$$v_{qr}^* = k_{pr} (i_{qr}^* - i_{qr}) + k_{icr} \int (i_{qr}^* - i_{qr}) + sL_r' i_{dr} \quad (11)$$

که مقادیر  $i_{dr}^*$  و  $i_{qr}^*$  به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$i_{dr}^* = \frac{-L_s}{L_m \varphi_s} \left[ k_{p\omega} (\omega_r^* - \omega_r) + k_{i\omega} \int (\omega_r^* - \omega_r) \right] + k_p (P_e^* - P_e) \quad (12)$$

$$i_{qr}^* = -k_{pv} (V_s^* - V_s) - k_{iv} \int (V_s^* - V_s) + Q_s \quad (13)$$

### ۳-۲- کنترل کننده مبدل سمت شبکه

مبدل سمت شبکه وظیفه کنترل ولتاژ لینک dc را به همراه کنترل توان راکتیو عبوری از سمت این مبدل به شبکه بر عهده دارد. این دو حلقه

راکتیو در این روش به جریان محور  $d$  وابسته است که این جریان نیز از طریق  $v_{dr}$  قابل کنترل است.

### ترانس تحریک و ولتاژ خازن لینک مستقیم: برای مدل کردن

قسمت مبدل سمت شبکه معمولاً به دلیل وجود اندوکتانس در مسیر مبدل شبکه (اندوکتانس فیلتر در توربین‌های بادی و یا اندوکتانس نشستی ترانس تحریک در پمپ-توربین‌های تلمبه ذخیره‌ای) از دینامیک جریان عبوری از اندوکتانس‌ها برای مدل کردن این قسمت استفاده می‌شود. روابط حاکم بر ترانس تحریک با صرف نظر از دینامیک مبدل به صورت رابطه (۹) قابل ارایه است [۶]. شایان ذکر است که جهت جریان انتخابی از شبکه به سمت ترانس تحریک مثبت فرض می‌شود.

$$\begin{aligned} \frac{L_{tr}}{\omega_b} \frac{di_{dg}}{dt} &= -R_{tr} i_{dg} + L_{tr} i_{qg} - v_{dg} + v_{ds} \\ \frac{L_{tr}}{\omega_b} \frac{di_{qg}}{dt} &= -R_{tr} i_{qg} - L_{tr} i_{dg} - v_{qg} \\ C \frac{dv_{dc}}{dt} &= -\frac{P_r}{V_{dc}} + \frac{P_g}{V_{dc}} \end{aligned} \quad (9)$$

که  $P_r$  و  $P_g$  به ترتیب توان اکتیو سمت روتور و شبکه هستند و به صورت زیر تعریف می‌شوند.

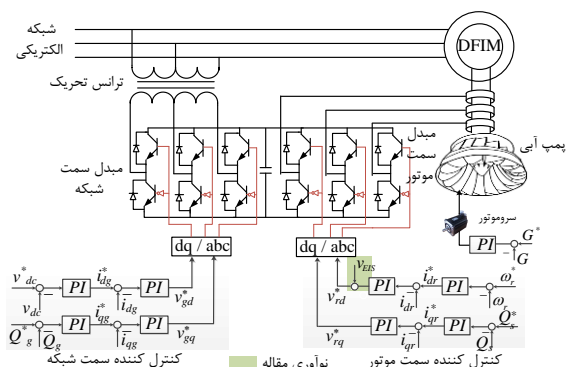
$$P_r = v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr}, P_g = v_{dg} i_{dg} + v_{qg} i_{qg}$$

تا اینجا مدل قسمت‌های مختلف یک نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای دور متغیر مبتنی بر DFIM ارائه شد که می‌توان برای طراحی کنترل کننده کلاسیک و شبیه سازی سیستم از آن استفاده کرد. در بخش بعد نحوه طراحی کنترل کننده برای قسمت‌های مختلف توضیح داده می‌شود.

## ۳- طراحی کنترل کننده برداری کلاسیک

کنترل کننده نیروگاه در مد موتوری به سه قسمت مجزا تقسیم می‌شود:

- ۱- کنترل کننده مبدل سمت موتور ۲- کنترل کننده مبدل سمت شبکه،
- ۳- کنترل کننده پمپ.

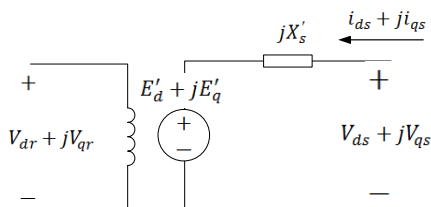


شکل ۱: شماتیک کنترل کننده پیشنهادی در مقاله برای یک واحد تلمبه ذخیره‌ای دور متغیر با مبدل پشت به پشت

طبق کدهای استاندارد در هر شبکه، نیروگاه‌های دور متغیر مبتنی بر DFIM نیاز به استفاده از تجهیزات گذر از خطا دارند [۷]. رایج‌ترین تجهیزاتی که در نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند ترمز لینک dc است [۹]. برای روشن شدن دلیل پیشنهاد سیگنال کمکی در این مقاله، نحوه عملکرد این تجهیز به طور مختصر توضیح داده می‌شود. ترمز لینک dc از یک سوئیچ و یک مقاومت تشکیل شده است که با لینک dc موازی می‌شود [۸]. در شرایط خطا اضافه ولتاژ بوجود آمده بر روی سیم‌پیچ‌های روتور می‌تواند باعث عبور جریان گذرای شدیدی از سیم‌پیچ‌های روتور شود. همچنین، این اضافه جریان موجب ایجاد اضافه ولتاژ در لینک dc می‌شود. برای رفع مشکل اضافه ولتاژ در لینک dc، مقاومت موازی با لینک dc در حین خطا توسط سوئیچ فعال شده و انرژی اضافی موجود در لینک dc در این مقاومت تلف می‌شود. از طرفی برای رفع مشکل اضافه جریان در سیم‌پیچ‌های روتور، مبدل سمت موتور در حین خطا از موتور جدا می‌شود [۸]. از این رو، اتلاف انرژی در مقاومت موازی با لینک dc، از دست رفتن کنترل مبدل سمت موتور به دلیل جدا شدن این مبدل از موتور در حین خطا و هزینه نصب ترمز لینک dc از معایب اصلی این روش به شمار می‌روند.

با توجه به مطالب گفته شده، در این مقاله یک سیگنال کمکی پیشنهاد و طراحی می‌شود تا ولتاژ القایی روی سیم‌پیچ‌های روتور در حین خطا توسط این سیگنال جبران شود. در بخش ۲ مدل‌سازی و طراحی کنترل کننده برداری کلاسیک برای یک واحد تلمبه ذخیره‌ای دور متغیر انجام گرفت. برای ارتقا کنترل کننده برداری کلاسیک توسط یک ورودی کمکی دو موضوع را باید مورد توجه قرار دهیم. ۱- از آنجا که کنترل کننده غیرخطی کمکی برای لحظات گذرا طراحی می‌شود، نیاز است تا مدل ماشین مجدداً بر اساس الگوهای آرایه شده در مراجع بازنویسی شود و از این مدل برای طراحی کنترل کننده ورودی کمکی استفاده شود. ۲- ورودی کمکی تعریف شده برای ارتقا سرعت عملکرد حلقه‌های خارجی در مبدل سمت موتور به کار گرفته می‌شوند، لذا در طراحی این ورودی متغیرهایی در نظر گرفته خواهند شد که حلقه‌های خارجی را تشکیل می‌دهند (توان اکتیو و ولتاژ استاتور).

یکی از مدل‌های معروف ماشین‌های القایی، در نظر گرفتن ولتاژ حالت گذرا پشت راکتانس گذرا برای مدار روتور و صرف نظر از دینامیک مدار استاتور می‌باشد. از آنجا که در مدل‌سازی انجام شده در بخش ۲ تمامی جریان‌ها به صورت موتوری (به سمت داخل ماشین مثبت) در نظر گرفته شد، لذا در این قسمت نیز از همین فرض استفاده می‌کنیم. به عبارتی دیگر روابط موجود در ماشین طوری بازنویسی خواهند شد که شکل ۲ برقرار شود.



کنترلی با به کارگیری استراتژی ولتاژ استاتور در جهت محور d، به ترتیب بر روی محورهای d و q قرار خواهند گرفت.

طبق روش‌های تنظیم ضرایب جبران کننده در حلقه‌های پشت سرهم در مرجع [۲۴] پهنای باند حلقه بسته جریان (حلقه داخلی) ۱۰-۲۰ درصد از فرکانس سوئیچینگ مبدل و پهنای باند حلقه‌های خارجی باید حدود ۱۰ درصد از پهنای باند حلقه بسته جریان روتور (حلقه داخلی) تعیین شوند.

مقادیر مرجع برای ولتاژ محورهای dq از مبدل سمت شبکه به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$v_{dg}^* = -k_{pcg} (i_{dg}^* - i_{dg}) - k_{icg} \int (i_{dg}^* - i_{dg}) + L_{tr} i_{qg} + v_{ds} \quad (14)$$

$$v_{qg}^* = -k_{pcg} (i_{qg}^* - i_{qg}) - k_{icg} \int (i_{qg}^* - i_{qg}) - L_{tr} i_{dg} \quad (15)$$

که مقادیر  $i_{dg}^*$  و  $i_{qg}^*$  به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$i_{dg}^* = k_{pvdc} (V_{dc}^* - V_{dc}) + k_{ivdc} \int (V_{dc}^* - V_{dc}) \quad (16)$$

$$i_{qg}^* = k_{ppf} (Q_g^* - Q_g) + k_{ipf} \int (Q_g^* - Q_g) \quad (17)$$

### ۳-۳ کنترل کننده پمپ

مقدار درجه ورودی در مد پمپی، بر اساس حداکثر بازدهی پمپ تعیین می‌شود [۲۵]. مطابق شکل ۱، با مقایسه مقدار درجه ورودی پمپ یعنی  $G$  و مقدار مرجع  $G^*$ ، ولتاژ ورودی مرجع برای اعمال به سروموتور یعنی  $v_{sm\_p}$  مطابق رابطه (۱۸) تعیین می‌شود.

$$v_{sm\_p} = k_{pg} (G^* - G) + k_{ig} \int (G^* - G) \quad (18)$$

شایان ذکر است که تنظیم ضرایب کنترلی نشان داده شده در این بخش با روش‌های رایج در مراجع [۲۴] انجام شده است که توضیح آن از اهداف مقاله به دور است. ضمناً همگی این مقادیر در جدول ۱ آورده شده‌اند.

جدول ۱: ضرایب سیستم کنترلی کلاسیک

مقادیر ضرایب کنترلی تناسبی و انتگرالی					
$k_{pw}$	۲/۳	$k_{pvdc}$	۸	$k_{pg}$	۵
$k_{iv}$	۰/۲	$k_{ivdc}$	۴۰۰	$k_{ig}$	۰/۴
$k_{pv}$	۰/۹	$k_{ppf}$	۰/۱	$k_p$	۰/۵
$k_{iv}$	۰/۱	$k_{ipf}$	۰/۱		
$k_{pcr}$	۱۰	$k_{pcg}$	۵۰		
$k_{icr}$	۰/۱	$k_{icg}$	۱/۵		

### ۴- طراحی کنترل کننده پیشنهادی

$$f^T(x)Px + x^T Pf(x) = 0 \quad (26)$$

که ماتریس  $P$  از حل معادله لیاپانوف یعنی رابطه (۲۷) برای سیستم خطی با ماتریس  $A'$  بدست می‌آید.

$$A'^T P + PA' = -Q \quad (27)$$

که ماتریس  $Q$  می‌تواند هر ماتریس مثبت معین دلخواه باشد [۲۶].  
لم ۱: در یک سیستم خطی با مرتبه  $n$  و ماتریس‌های  $A$  و  $B$  در صورتی که ماتریس کنترل پذیری  $\Phi_c$  و رویت پذیری  $\Phi_0$  تعریف شده در (۲۸) دارای رتبه کامل باشند، ماتریس فیدبک حالت  $k$  وجود دارد که بتوان سیستم را به صورت پایدار طراحی نمود.

$$\Phi_c = [B \quad AB \quad \dots \quad A^{n-1}B] \quad (28)$$

$$\Phi_0 = [C \quad CA \quad \dots \quad CA^{n-1}]^T$$

اثبات لم ۱: به مرجع [۱۲] مراجعه شود.

اثبات قضیه ۱: با بررسی پایداری مجانبی سیستم تعریف شده در (۲۴) بر اساس تئوری لیاپانوف می‌توان قضیه ۱ را اثبات نمود. برای رسیدن به این هدف، در ابتدا کاندیدای تابع لیاپانوف را به صورت تابع درجه دوم مثبت معین که یکی از متداول‌ترین انتخاب‌ها به عنوان تابع انرژی است به صورت (۲۹) تعریف می‌کنیم.

$$V(x) = 0.5x^T Px > 0 \quad (29)$$

که ماتریس  $P$  از حل رابطه (۲۷) که به معادله لیاپانوف برای سیستم‌های خطی پیوسته معروف است محاسبه می‌شود [۲۶]. شایان ذکر است که ماتریس  $A'$  مربوط به قسمت خطی رابطه (۲۴) است که ورودی آن با فیدبک حالت طراحی شده و پایداری سیستم خطی تضمین می‌شود.

از طرفی طبق روش مستقیم لیاپانوف [۲۶]، یک سیستم با تابع انرژی مثبت معین در صورتی پایدار خواهد بود که مشتق تابع انرژی و یا تغییرات انرژی تعریف شده منفی باشد. این مطلب به صورت ریاضی با رابطه  $\dot{V}(x) < 0$  تعریف می‌شود. برای همین از رابطه (۲۹) مشتق گرفته و با استفاده از رابطه (۲۵) به صورت (۳۰) بازنویسی می‌کنیم.

$$\dot{V}(x) = 0.5(A'x + f(x))^T Px + 0.5x^T P(A'x + f(x)) \quad (30)$$

با مرتب کردن رابطه (۳۰) خواهیم داشت

$$\dot{V}(x) = \underbrace{0.5x^T (A'^T P + PA')x}_{Linear} + \underbrace{0.5(f^T(x)Px + x^T Pf(x))}_{Nonlinear} \quad (31)$$

اگر رابطه (۳۱) یک تابع منفی معین باشد یعنی  $\dot{V}(x) < 0$ ، سیستم پایدار خواهد بود. قسمت اول رابطه (۳۱) که با Linear مشخص شده

شکل ۲: مدار معادل حالت گذرا برای یک ماشین القایی از دو سو تغذیه

در نتیجه می‌توان گفت که:

$$jE' = \frac{L_m}{L_r} \varphi_r \quad (19)$$

$$X'_s = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$$

که  $X'_s$  راکتانس گذرا سیم پیچ استاتور است. با انتخاب دو متغیر تعریف شده در رابطه (۱۹) می‌توان روابط معروف ماشین در (۶) را مجدداً به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\frac{1}{\omega_b} \frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T_o'} \left( E'_d + \frac{L_m^2}{L_r} i_{qs} \right) + sE'_q - \frac{L_m}{L_r} v_{qr} \quad (20)$$

$$\frac{1}{\omega_b} \frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T_o'} \left( E'_q - \frac{L_m^2}{L_r} i_{ds} \right) - sE'_d + \frac{L_m}{L_r} v_{dr}$$

که  $T_o' = L_r / R_r$  ثابت زمانی مدار باز استاتور است و رابطه ولتاژ استاتور و ولتاژ گذرا با یکدیگر به صورت زیر نشان داده می‌شود.

$$\begin{aligned} v_{ds} &= R_s i_{ds} - X'_s i_{qs} + E'_d \\ v_{qs} &= R_s i_{qs} - X'_s i_{ds} + E'_q \end{aligned} \quad (21)$$

همچنین می‌توان توان راکتور و گشتاور الکتریکی را به صورت (۲۲) برای مد موتوری بدست آورد.

$$\begin{aligned} T_e &= E'_d i_{ds} + E'_q i_{qs} \\ Q_s &= -E'_d i_{qs} + E'_q i_{ds} \end{aligned} \quad (22)$$

**قضیه ۱:** یک سیستم زمان-پیوسته غیرخطی با متغیر حالت  $x$  و ورودی  $u$  مطابق رابطه (۲۳) را مد نظر قرار دهید.

$$\dot{x} = F(x) + G(x, u) \quad (23)$$

فرض می‌شود سیستم معادله (۲۳) را حول نقطه کار خطی کرده و معادلات به صورت (۲۴) بازنویسی شود.

$$\dot{x} = Ax + Bu + f(x) \quad (24)$$

که ماتریس  $A$  و  $B$  ماتریس‌های خطی شده حالت و ورودی سیستم غیرخطی حول نقطه کار و همچنین ماتریس  $f(x)$  قسمت غیرخطی معادلات سیستم فرض می‌شوند. همچنین فرض می‌شود متغیرهای حالت سیستم خطی بدست آمده رویت پذیر بوده و ورودی این سیستم کنترل پذیر بوده، لذا ورودی‌های سیستم توسط فیدبک حالت  $u = -kx$  طراحی می‌شوند و می‌توان سیستم خطی جدید با تعریف  $A' = A - Bk$  را به صورت زیر بیان کرد.

$$\dot{x} = A'x + f(x) \quad (25)$$

در این صورت سیستم تعریف شده در (۲۵) پایدار است اگر

حالت‌های گذرا و برای طراحی کنترل کننده کمکی در مبدل سمت موتور صرف نظر می‌شود ( $\Delta P_m = 0$ ). با در نظر گرفتن این نکته و معادلات حالت گذرا برای بدست آوردن مشتق متغیرهای تعریف شده در معادلات (۲۰) و (۲۱) می‌توان دینامیک خطاهای تعریف شده را به صورت (۳۵) محاسبه کرد.

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} e_2 \\ \frac{\omega_b}{2H} \left[ \frac{(e_3 + T_e^*)}{T_o'} - (1 - (e_1 + \omega_r^*)) \right] Q_s \\ + (v_{dr} i_{qs} - v_{qr} i_{ds}) L_m / L_r \\ \omega_b \left[ \frac{(e_3 + T_e^*)}{T_o'} - (1 - (e_1 + \omega_r^*)) \right] Q_s \\ + (v_{dr} i_{qs} - v_{qr} i_{ds}) L_m / L_r \\ \omega_b \left[ -\left( \frac{e_4 + V_{ds}^*}{T_o'} - R_s i_{ds} + L_s i_{qs} \right) + \right. \\ \left. (1 - (e_1 + \omega_r^*)) (-R_s i_{qs} - X_s i_{ds}) \right] \\ \left. - v_{qr} L_m / L_r \right] \end{bmatrix} \quad (35)$$

حال برای جدا کردن قسمت‌های خطی و غیرخطی خطا از یکدیگر، معادلات دینامیک خطا در (۳۵) به فرم معادله (۲۴) بازنویسی می‌شوند. که ماتریس  $A$  و  $B$  مرتبط با سیستم خطی شده حول صفر و ماتریس  $f(e)$  جملات غیرخطی سیستم تعریف شده را نشان می‌دهند، که به صورت (۳۶) بدست خواهند آمد. ماتریس  $e$  ماتریس خطای تعریف شده طبق (۳۴)،  $u$  ماتریس ورودی سیستم شامل ولتاژ محور  $dq$  از مبدل سمت ماشین،  $v_{dr}$  و  $v_{qr}$ ، طبق رابطه (۳۳) و  $f(e)$  ماتریس قسمت غیرخطی دینامیک خطا طبق (۳۶) می‌باشد. قابل توجه است که سیگنال ورودی کمکی نیز که در این بخش به عنوان نوآوری ذکر شد در ماتریس  $f(e)$  ظاهر می‌شود.

است نشان دهنده تاثیر سیستم خطی تعریف شده در رابطه (۲۴) بر روی مشتق تابع لیاپانوف خواهد بود. طبق توضیحات داده شده در قبل و برقرار بودن رابطه (۲۷)، قسمت اول رابطه (۳۱) منفی خواهد بود. برای منفی شدن کل رابطه (۳۱)، باید قسمت دوم (Nonlinear) صفر شود، یعنی

$$f^T(x)Px + x^T Pf(x) = 0 \quad (32)$$

همانطور که گفته شد، در این بخش یک سیگنال کمکی غیرخطی برای مبدل سمت موتور در نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای دور متغیر طراحی می‌شود. به عنوان یادآوری متذکر می‌شود که در روش کنترل کننده برداری کلاسیک که در بخش ۲ طراحی شد، ولتاژ روتور در محورهای  $dq$  برای مبدل سمت موتور از طریق دو حلقه کنترلی پشت سرهم روی هر محور ایجاد شده و اهداف کنترلی تعیین شده توسط مبدل برآورده می‌شوند. در حالیکه، در کنترل برداری بهبود یافته ولتاژ بدست آمده از محور  $d$  با سیگنال کمکی غیرخطی جمع شده و به مدولاسیون پهنای پالس برای تولید آرایش سوئیچینگ مبدل داده می‌شود، که به صورت ریاضی می‌توان معادله (۳۳) را نوشت.

$$\begin{aligned} v_{dr}^* &= v_{dr\_vec}^* + v_{EIS} \\ v_{qr}^* &= v_{qr\_vec}^* \end{aligned} \quad (33)$$

برای طراحی سیگنال کمکی  $v_{EIS}$ ، در ابتدا یک سیستم کاهش یافته با مرتبه ۴ از نیروگاه شامل مبدل سمت موتور در نظر گرفته می‌شود. سپس معادلات حالت این سیستم را شبیه معادله (۲۳) و (۲۴) مرتب می‌کنیم. سپس با استفاده از قضیه ۱ سیگنال کمکی  $v_{EIS}$  طوری محاسبه می‌شود که پایداری مجانبی این سیستم تضمین شود.

همانطور که گفته شد طراحی سیگنال کمکی بر اساس ایده جبران ولتاژ القایی روی سیم‌پیچ‌های روتور در شرایط خطا و افزایش سرعت عملکرد حلقه‌های خارجی مبدل سمت موتور انجام می‌شود. از طرفی چون نوع کنترل مبدل سمت موتور در این تحقیق حالت کنترل ولتاژ است (نه کنترل ضریب توان) لذا دو متغیر انحراف توان اکتیو  $\Delta P_e$  و انحراف ولتاژ استاتور  $\Delta V_s$  دو متغیری است که باید در طراحی کنترل کننده کمکی به کار گرفته شود. همچنین از آنجا که سرعت روتور و تغییرات سرعت روتور به دینامیک توان اکتیو وابسته هستند. این دو پارامتر نیز به دو متغیر قبلی اضافه خواهند شد. متغیرهای در نظر گرفته شده به صورت زیر مرتب می‌شوند.

$$e = [e_1 \quad e_2 \quad e_3 \quad e_4]^T \quad (34)$$

$$\begin{aligned} e_2 &= \Delta \dot{\omega} = \dot{\omega}, e_1 = \Delta \omega_r = \omega_r - \omega_r^* \\ e_4 &= \Delta V_s = V_s - V_s^*, e_3 = \Delta P_e = P_e - P_e^* \end{aligned}$$

این نکته باید در نظر گرفته شود، اگرچه متغیر سرعت و تغییرات آن را در محاسبات برای طراحی ورودی کمکی به حساب می‌آوریم، ولی به دلیل کند بودن دینامیک پمپ-توربین از تغییرات توان مکانیکی در

۱، سیگنال کمکی موجود در قسمت غیرخطی نیز محاسبه می‌شود. ورودی قسمت خطی با استفاده از روش تنظیم کننده مرتبه دوم بهینه (LQR) که یک روش طراحی کنترل کننده بهینه برای سیستم‌های خطی است طراحی می‌شود، یعنی  $u = -ke$ . طبق تعریف تنظیم کننده مرتبه دوم بهینه، ضرایب فیدبک حالت ( $k$ ) طوری طراحی می‌شوند که تابع هزینه در رابطه (۳۸) مینیمم شود.

$$J = \int_0^{\infty} (e^T H e + u^T R u) dt \quad (38)$$

که ماتریس‌های  $H$  و  $R$  به ترتیب ماتریس‌های قطری وزنی برای متغیرهای حالت و متغیرهای ورودی هستند. همچنین در طراحی فرض شده است که متغیرهای حالت تعریف شده در (۳۵) رویت پذیر و ورودی‌ها کنترل پذیر باشند.

طبق قضیه ۱ سیستم غیرخطی طراحی شده با فیدبک حالت خطی در صورتی پایدار است که رابطه (۳۲) برقرار باشد. در صورتی که ماتریس  $Q$  در رابطه (۲۷) یعنی معادله لیاپانوف متقارن باشد، ماتریس  $P$  نیز از حل همین معادله متقارن خواهد بود. لذا می‌توان رابطه (۳۲) را به صورت زیر نوشت.

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} = 0 \quad (39)$$

حال با جایگزین کردن مقادیر  $f_1$  تا  $f_4$  از روابط (۳۶) و برقراری رابطه (۳۹) خواهیم داشت.

$$\begin{aligned} & \left( f_2'(e) + \frac{\omega_b L_m}{2HL_r} i_{qs} v_{EIS} \right) \sum_{i=1}^4 e_i P_{i2} + \\ & \left( f_3'(e) + \frac{\omega_b L_m}{L_r} i_{qs} v_{EIS} \right) \sum_{i=1}^4 e_i P_{i3} + \\ & f_4'(e) \sum_{i=1}^4 e_i P_{i4} = 0 \end{aligned} \quad (40)$$

در نتیجه سیگنال کمکی  $v_{EIS}$  به صورت (۴۱) بدست خواهد آمد.

$$v_{EIS} = \frac{f_2'(e) \sum_{i=1}^4 e_i P_{i2} + f_3'(e) \sum_{i=1}^4 e_i P_{i3} + f_4'(e) \sum_{i=1}^4 e_i P_{i4}}{-\frac{\omega_b L_m}{L_r} i_{qs} \sum_{i=1}^4 e_i P_{i3} - \frac{\omega_b L_m}{2HL_r} i_{qs} \sum_{i=1}^4 e_i P_{i2}} \quad (41)$$

اگر سیگنال خطا در رابطه (۴۱) صفر شود، سیگنال کمکی تعریف شده در این رابطه مبهم می‌شود. ولی از روابط (۳۹) و (۴۰) مشخص است

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{\omega_b Q_{s0}}{2H} & 0 & \frac{\omega_b}{2HT_o} & 0 \\ \omega_b Q_{s0} & 0 & \frac{\omega_b}{T_o} & 0 \\ X_s' \omega_b i_{ds0} + \omega_b R_s i_{qs0} & 0 & 0 & -\frac{\omega_b}{T_o} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{\omega_b L_m}{2HL_r} i_{qs0} & -\frac{\omega_b L_m}{2HL_r} i_{ds0} \\ \frac{\omega_b L_m}{L_r} i_{qs0} & -\frac{\omega_b L_m}{L_r} i_{ds0} \\ 0 & -\frac{\omega_b L_m}{L_r} \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$f(e) = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ f_2'(e) + \frac{\omega_b L_m}{2HL_r} i_{qs} v_{EIS} \\ f_3'(e) + \frac{\omega_b L_m}{L_r} i_{qs} v_{EIS} \\ f_4'(e) \end{bmatrix}$$

همچنین  $f_2'(e)$ ،  $f_3'(e)$ ،  $f_4'(e)$  به صورت (۳۷) محاسبه می‌شوند.

$$f_2'(e) = \frac{\omega_b}{2H} \begin{bmatrix} \frac{T_e^*}{T_o} - s^* Q_s + e_1 (Q_s - Q_{s0}) + \\ \frac{L_m}{L_r} \left( -v_{qr} (i_{ds} - i_{ds0}) + \right. \\ \left. v_{dr} (i_{qs} - i_{qs0}) \right) \end{bmatrix}$$

$$f_3'(e) = \omega_b \begin{bmatrix} \frac{T_e^*}{T_o} - s^* Q_s + e_1 (Q_s - Q_{s0}) - \\ \frac{L_m}{L_r} \left( v_{qr} (i_{ds} - i_{ds0}) - \right. \\ \left. v_{dr} (i_{qs} - i_{qs0}) \right) \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$f_4'(e) = \omega_b \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_o} (V_{ds}^* - R_s i_{ds} + L_s i_{qs}) + \\ s^* (-R_s i_{qs} - X_s' i_{ds}) + \\ (R_s (i_{qs} - i_{qs0}) + X_s' (i_{ds} - i_{ds0})) e_1 \end{bmatrix}$$

که بالا نویس\* و زیر نویس 0 به ترتیب به مقادیر مرجع و نقطه کار اشاره دارند.

قابل توجه است که سیستم تعریف شده در (۳۵) دارای دو قسمت خطی و غیرخطی است. ورودی قسمت خطی توسط فیدبک حالت طراحی می‌شود. در نهایت با بررسی پایداری مجانبی این سیستم با قضیه



جدول ۳: پارامترهای پمپ-توربین آبی

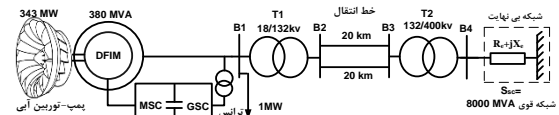
پمپ-توربین آبی				
$1/4$	$a_0$	$4/41$	$m$	$D_{ref}$
$-0/2$	$a_1$	۳۴۳	MW	$P_n$
$-0/3$	$a_2$	۴۵۰	rpm	$N_n$
$0/1$	$f_e$	۵۴/۳۸	$m^3/sec$	$Q_n$
$0/01$	$f_g$	۷۰۹/۲	$m$	$H_n$

نتایج نشان داده شده در شکل ۴ پاسخ شبیه‌سازی یک نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای دور متغیر در مد موتوری با استراتژی‌های قابلیت گذر از خطای متفاوت را نشان می‌دهد. حالت اول بدون به کارگیری هرگونه تجهیز اضافی برای گذر از خطاست (without FRT). همچنین حالت‌های دیگر با استفاده از چاپر ترمز لینک مستقیم (DC-link brake chopper) و با وجود کنترل کننده پیشنهادی در این مقاله (Advanced FRT) نشان داده شده‌اند. از این به بعد هر یک از این روش‌ها به ترتیب با حالت اول تا سوم ذکر خواهند شد. شکل ۴-الف ولتاژ لینک  $dc$  را نشان می‌دهد. طبق این شکل به طور واضح مشخص است که اگر هیچ روش گذر از خطایی به کار گرفته نشود، ولتاژ لینک  $dc$  به بیشتر از ۲ برابر مقدار نامی خواهد رسید. در حالیکه با استفاده از حالت دوم و سوم ولتاژ لینک  $dc$  در محدوده بین  $\pm 20\%$  از مقدار نامی حفظ شود. شکل ۴-ب جریان روتور را نشان می‌دهد. نوسانات در حالت اول و دوم تفاوتی را نشان نمی‌دهند، ولی با به کارگیری روش ارائه شده در این مقاله محدوده نوسانات تا ۲ پریونیت کاهش می‌یابد. توان اکتیو و راکتیو عبوری از موتور در شکل ۴-ج و د نشان داده شده‌اند که طبق این شکل‌ها به چند نکته می‌توان اشاره کرد. اول اینکه توان اکتیو مصرفی توسط موتور در حین خطا بر اساس توان مصرفی ترانس تحریک تعیین می‌شود. این توان نیز بر اساس ولتاژ شبکه که در حین خطا صفر شده است و ولتاژ اعمالی مبدل سمت شبکه بستگی دارد. طبق شکل در حالت سوم توان اکتیو کمتر شده که البته تا حدودی ممکن است تا حدودی اثر مخربی بر روی نقش موتور در کنترل فرکانس شبکه داشته باشد. همچنین در مورد توان راکتیو نیز در دو حالت دوم و سوم در حین خطا یکسان و صفر است. دلیل این امر هم صفر شدن ولتاژ شبکه و استاتور است. ولی به محض رفع خطا، توان راکتیو بیشتری در حالت سوم از شبکه نسبت به حالت دوم جذب می‌شود که این موضوع موجب می‌شود تا ولتاژ استاتور در حالت دوم نسبت به روش پیشنهادی با تاخیر قابل اغماضی به مقدار نامی برگردد (شکل ۴-و). یکی دیگر از مزایای استفاده از روش پیشنهادی در این مقاله را می‌توان در نوسانات کمتر گشتاور الکتریکی بر روی شفت دانست (طبق شکل ۴-ف). نوسانات گشتاور الکتریکی بر روی شفت و تجهیزات مکانیکی دیگر در حین خطا می‌تواند عمر مفید این تجهیزات را به شدت کاهش دهد.

که اگر ماتریس  $e$  صفر شود رابطه (۳۲) برقرار بوده و سیگنال کمکی  $v_{EIS}$  می‌تواند بای پس شود. این موضوع نشان می‌دهد که سیگنال کمکی فقط در حالت‌های گذرا و غیر دائمی دارای مقدار بوده و در حالت دائمی کنترل کننده این مقاله و کنترل کننده برداری کلاسیک هیچ فرقی با هم نخواهند داشت. اما اگر هر یک از متغیرهای کنترلی از مقدار مرجع فاصله بگیرند (در حین خطا) سیگنال کمکی با افزودن ولتاژ به صورت مستقیم، پاسخ سیستم را در گذر از خطا بهبود می‌بخشد.

## ۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش برای آزمودن کنترل کننده پیشنهادی، یک نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای دور متغیر متصل به شین بی‌نهایت از طریق دو ترانس افزاینده و دو خط انتقال مطابق شکل ۳ شبیه‌سازی و نتایج ارائه می‌شود.



شکل ۳: شمای کلی یک نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای دور متغیر متصل به شین بی-نهایت

اطلاعات ماشین و پمپ-توربین در جدول ۲ و جدول ۳ آورده شده‌اند. برای سنجش عملکرد روش گذر از خطا که در این بخش از مقاله پیشنهاد شده است، نتایج شبیه‌سازی برای یک خطای سه فاز در نزدیکی شینه موتور یعنی  $B_1$  ارائه خواهد شد.

با در نظر گرفتن ماتریس‌های قطری  $H$  و  $R$  به ترتیب به صورت  $H = \text{diag} [0.01 \ 1 \ 2 \ 1]$  و  $R = \text{diag} [1 \ 1]$  و نقطه کار برای نقطه کار  $w_{ref}=1.04 \text{ p.u.}$ ,  $P_{ref}=0.8 \text{ p.u.}$ ,  $Q_{ref}=-0.1$  ماتریس فیدبک حالت  $k$  به صورت زیر بدست آورده می‌شود.

$$k = \begin{bmatrix} 2.2134 & -0.0234 & 2.3676 & -1.4769 \\ 0.5031 & 0.0367 & -2.0896 & -1.6768 \end{bmatrix}$$

علاوه بر این با در نظر گرفتن ماتریس  $Q$  برای حل معادله لیاپانوف به صورت ماتریس واحد یعنی  $Q = \text{diag} [1 \ 1 \ 1 \ 1]$  ماتریس  $P$  از حل این معادله برای نقطه کار مشخص شده به صورت زیر بدست آورده می‌شود.

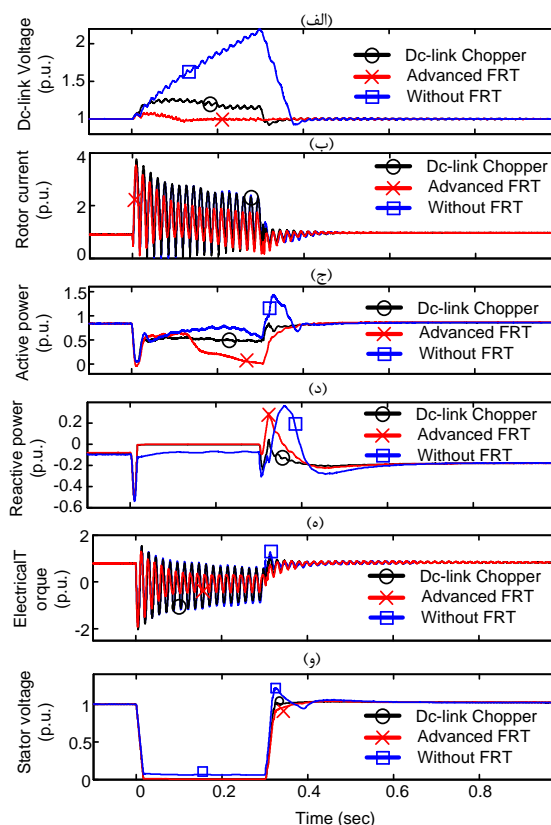
$$P = \begin{bmatrix} 0.6357 & -0.5 & 0.0132 & -0.0032 \\ -0.5 & 0.7448 & -0.0057 & 0.0044 \\ 0.0132 & -0.0057 & 0.0017 & -0.0015 \\ -0.0032 & 0.0044 & -0.0015 & 0.0027 \end{bmatrix}$$

جدول ۲: پارامترهای ماشین القایی از دو سو تغذیه با توان ۳۸۱ MVA (واحد پارامترهایی که ذکر نشده در مبنای یکایی است)

ماشین القایی از دو سو تغذیه							
$0/3$	$F$	$C$	$4/45$	$kV$	$V_{den}$	$4/26$	$L_s$
$7$	$\%$	$S$	$381/1$	$MVA$	$S_n$	$4/272$	$L_r$
$7/7$	$sec$	$H$	$361/07$	$MVA$	$S_{ns}$	$0/0174$	$R_s$
$60$	$Hz$	$f$	$49/25$	$MVA$	$S_{n-RSC}$	$0/002$	$R_r$
$16$	$P$	$P$	$26/93$	$MVA$	$S_{n-GSC}$	$4$	$L_m$

## مراجع:

- [1] Z. Ming, Z. Kun, L. Daoxin "Overall review of pumped-hydro energy storage in China: Status quo, operation mechanism and policy barriers" *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 17, pp. 35-43, 2013.
- [2] G. Ardizzon, G. Cavazzini, G. Pavesi "A new generation of small hydro and pumped-hydro power plants: Advances and future challenges" *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 746-761, 2014.
- [3] P. Punys, R. Baublys, E. Kasiulis, A. Vaisvila, B. Pelikan, J. Steller "Assessment of renewable electricity generation by pumped storage power plants in EU Member States" *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 26, pp. 190-200, 2013.
- [4] M. Alizadeh Bidgoli, S.M.T. Bathaee "Full-state Variables Control of a Grid-connected Pumped Storage Power Plant Using Non-linear Controllers" *Elect. Power Comp. Syst.*, vol. 43, pp. 1-11, 2015.
- [5] J. Morren and S. W. H. de Haan, "Short-Circuit Current of Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generator" *IEEE Trans. Energy. Conv.*, vol. 22, pp. 174-180, 2007.
- [6] M. Alizadeh Bidgoli, S.M.T. Bathaee, A. Shabani "Design a nonlinear auxiliary input for DFIG-based application using Lyapunov theory," 5th Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, 2014.
- [7] G. Pannell, D. J. Atkinson and, B. Zahawi, Minimum-Threshold Crowbar for a Fault-Ride-Through Grid-Code-Compliant DFIG Wind Turbine, *IEEE Trans. Energy. Conv.*, vol. 25, pp. 750-759, 2010.
- [8] G. Pannell, B. Zahawi, D. J. Atkinson and P. Missailidis, Evaluation of the Performance of a DC-Link Brake Chopper as a DFIG Low-Voltage Fault-Ride-Through Device, *IEEE Trans. Energy. Conv.*, vol. 28, pp. 535-542, 2013.
- [9] S. Auber, Power on tap from variable speed pumped water storage scheme, ABB Com. (2012) [Online] Available: [http://www.ee.co.za/wp-content/uploads/legacy/energize\\_2012/06\\_GT\\_01\\_Power-on-tap.pdf](http://www.ee.co.za/wp-content/uploads/legacy/energize_2012/06_GT_01_Power-on-tap.pdf).
- [10] C. Wessels, F. Gebhardt and W. F. Fuchs, Fault Ride-Through of a DFIG Wind Turbine Using a Dynamic Voltage Restorer during Symmetrical and Asymmetrical Grid Faults, *IEEE Trans. Power Elect.*, vol. 26, pp. 807-815, 2011.



شکل ۴: پاسخ در حین خطای ماشین در شکل ۳ به یک خطای سه فاز با مدت زمان ۳۰۰ میلی‌ثانیه برای نقطه کار  $w_{ref}=1.04 p.u.$ ,  $P_{ref}=0.8 p.u.$ ,  $Q_{ref}=0.1$

## ۶- نتیجه گیری

نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای دور متغیر مبتنی بر ماشین DFIM در مد موتوری می‌توانند با تغییر دور توان مصرفی موتور را تغییر داده و در کنترل فرکانس شبکه مشارکت کنند. در این مقاله یک کنترل کننده برداری بهبود یافته برای مبدل سمت موتور جهت افزایش قابلیت گذر از خطای این نیروگاه پیشنهاد شد. این کنترل کننده از دو قسمت تشکیل می‌شود. قسمت اول شامل یک کنترل کننده برداری کلاسیک به صورت غیر متمرکز است که برای مبدل سمت موتور طراحی و ضرایب کنترلی آن تنظیم شده است. قسمت دوم کنترل کننده پیشنهادی از یک سیگنال کمکی جدید مبتنی بر روش غیرخطی لیاپانوف تشکیل شده است که به منظور افزایش قابلیت گذر از خطای ماشین طراحی و پیشنهاد شده است. سیگنال کمکی پیشنهاد شده با توجه به ظرفیت مبدل‌ها می‌تواند ولتاژ القایی روی سیم‌پیچ‌های روتور، که عامل اصلی به وجود آورنده اضافه جریان و اضافه ولتاژ در حین خطا هستند را جبران کند. این سیگنال نه تنها می‌تواند نیاز به استفاده از ادوات حفاظتی کلاسیک برای عبور از خطا (کروبار و چاپر ترمز لینک dc) را حذف نماید، بلکه با توجه به نتایج شبیه‌سازی ارائه شده نشان داده شد که میرایی مناسب گشتاور الکتریکی و جریان روتور در حین خطا می‌تواند عمر مفید تجهیزات را افزایش دهد.

- [19] M. Mohseni, S. M. Islam, "Transient Control of DFIG-Based Wind Power Plants in Compliance With the Australian Grid Code" IEEE Trans. Power. Electr., vol. 27, pp. 2813-2824, 2012.
- [20] L. Yang, Z. Xu, J. Østergaard, Z. Y. Dong, K. P. Wong, "Advanced Control Strategy of DFIG Wind Turbines for Power System Fault Ride through" IEEE Trans. Power Syst., vol. 27, pp. 713-722, 2012.
- [21] D. Xie, Z. Xu, L. Yang, J. Østergaard, Y. Xue, and K. P. Wong, "A Comprehensive LVRT Control Strategy for DFIG Wind Turbines with Enhanced Reactive Power Support" IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, 3302-3310, 2013.
- [22] S. Xiao, G. Yang, H. Zhou, H. Geng "An LVRT Control Strategy Based on Flux Linkage Tracking for DFIG-Based WECS" IEEE Trans. Indus. Elect., vol. 60, Jul. 2013.
- [23] J. Liang and R. G. Harley "Pumped Storage Hydro-Plant Models for System Transient and Long-Term Dynamic Studies," IEEE, Power and Energy Society General Meeting, 2010.
- [24] W. Leonhard, Control of Electrical Drives. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1990.
- [25] Y. Pannatier, B. Kawkabani, C. Nicolet, J. J. Simond, A. Schwery and P. Allenbach "Investigation of Control Strategies for Variable-Speed Pump-Turbine Units by Using a Simplified Model of the Converters" IEEE Trans. Industr. Electr., vol. 57, no. 9, pp. 3039-3049, Sep 2010.
- [26] J. E. Slotine, W. Li, "Applied Nonlinear Control" Prentice-Hall, 1991.
- [11] O. Abdel-Baqi and A. Nasiri, Series Voltage Compensation for DFIG Wind Turbine Low-Voltage Ride-Through Solution, IEEE Trans. Energy. Conv., vol. 26, pp. 272-280. 2011.
- [12] M. Rahimi and M. Parniani "Coordinated Control Approaches for Low-Voltage Ride-Through Enhancement in Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generators" IEEE Trans. Energy Conv., vol. 25, no. 3, Sep. 2010.
- [13] M. Rahimi, M. Parniani "Low voltage ride-through capability improvement of DFIG-based wind turbines under unbalanced voltage dips" Int. Jour. Electri. Power Energy Syst. vol. 60, pp.82-95, 2014.
- [14] J. Yao, H. Li, Y. Liao, and Z. Chen, An Improved Control Strategy of Limiting the DC-Link Voltage Fluctuation for a Doubly Fed Induction Wind Generator, IEEE Trans. Power. Elect., vol. 23, pp. 1205-1213, 2008.
- [15] M. Rahimi and M. Parniani, "Transient Performance Improvement of Wind Turbines With Doubly Fed Induction Generators Using Nonlinear Control Strategy," IEEE Trans. Energy. Convers., vol. 25, no. 2, pp. 514-525, Jun. 2010.
- [16] A. Petersson, L. Harnefors, and T. Thiringer, "Evaluation of current control methods for wind turbines using doubly-fed induction machines," IEEE Trans. Power Electron., vol. 20, no. 1, pp. 227-235, Jan. 2005.
- [17] D. Xiang, L. Ran, P. J. Tavner, and S. Yang "Control of a Doubly Fed Induction Generator in a Wind Turbine during Grid Fault Ride-Through" IEEE Trans. Energy Conv., vol. 21, Sep. 2006.
- [18] S. Hu, X. Lin, Y. Kang, and X. Zou "An Improved Low-Voltage Ride-Through Control Strategy of Doubly Fed Induction Generator During Grid Faults" IEEE Trans. Power Electr., vol. 26, no. 12, Dec. 2011.

### فهرست علائم

مولفه‌های dq جریان روتور (p.u.)	$i_{qr}, i_{dr}$
مولفه‌های dq جریان مبدل سمت شبکه (p.u.)	$i_{qg}, i_{dg}$
مولفه‌های dq جریان استاتور (p.u.)	$i_{qs}, i_{ds}$
مولفه‌های dq ولتاژ استاتور (p.u.)	$v_{qs}, v_{ds}$
مولفه‌های dq ولتاژ روتور (p.u.)	$v_{qr}, v_{dr}$
مولفه‌های dq ولتاژ مبدل سمت شبکه (p.u.)	$v_{qg}, v_{dg}$
مولفه‌های dq شار استاتور (p.u.)	$\varphi_{qs}, \varphi_{ds}$
سرعت زاویه‌ای روتور (p.u.) و مینا (rad/s)	$\omega_b, \omega_r$
گشتاور مکانیکی و الکتریکی (p.u.)	$T_e, T_m$
توان الکتریکی اکتیو و راکتیو (p.u.)	$Q_e, P_e$
مولفه‌های dq ولتاژ گذرا (p.u.)	$E'_q, E'_d$
اندوکتانس استاتور، روتور و مغناطیس کنندگی (p.u.)	$L_m, L_r, L_s$
اندوکتانس و مقاومت ترانس تحریک (p.u.)	$R_{tr}, L_{tr}$
مقاومت استاتور و روتور (p.u.)	$R_r, R_s$
ثابت اینرسی ماشین (s) و لغزش	$H, s$
درصد باز شدن دریچه ورودی پمپ (p.u.)	$G$
هد خالص استاتیک و هد استاتیک (p.u.)	$H_s, H'_s$
هد و دبی آب خروجی پمپ (p.u.)	$Q_p, H_p$
ضریب تناسبی - انتگرالی حلقه جریان مبدل سمت روتور	$k_{icr}, k_{pcr}$
ضریب تناسبی - انتگرالی حلقه جریان مبدل سمت شبکه	$k_{icg}, k_{pcg}$
ضریب تناسبی - انتگرالی حلقه ولتاژ dc	$k_{ivdc}, k_{pvdc}$
ضریب تناسبی - انتگرالی حلقه دریچه پمپ	$k_{ig}, k_{pg}$
ضریب تناسبی - انتگرالی حلقه ولتاژ	$k_{iv}, k_{pv}$
ضریب تناسبی - انتگرالی حلقه سرعت	$k_{i\omega}, k_{p\omega}$
ضریب تناسبی - انتگرالی حلقه توان راکتیو	$k_{ipf}, k_{ppf}$
ضریب تناسبی حلقه توان	$k_p$