نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant

سال چهارم / شماره چهاردهم / پاییز ۱۳۹۶ 4th Year / No. 14 / December 2017

طراحی و پیاده‌سازی کنترل‌کننده پیش‌بین توان برای ژنراتور القایی دو سو تغذیه توسط مؤلفه‌های *dq* جریان روتور در سیستم تبدیل انرژی میکرو نیروگاه آبی

حامد جواهری فرد[۱]
حمیدرضا نجفی[*۲]
حسین الیاسی[۳]

چکیده

نیروگاه‌های میکرو برق‌آبی امروزه به‌عنوان یک منبع اصلی از انرژی‌های تجدید پذیر به‌حساب می‌آیند. آن‌ها قابل‌اعتماد و در تولید حجم کمی از انرژی بسیار کارآمد هستند. این نیروگاه‌ها غالباً برق نواحی روستایی را تولید می‌کنند؛ بااین‌وجود، واحدهای تولیدی میکرو برق‌آبی عموماً از شبکه برق جداشده و نیاز به سیستم‌های کارآمد کنترلی برای حفظ پارامترهایی نظیر توان و فرکانس در هر شرایط کاری دارند. در ساختار میکرو نیروگاه آبی از دو ماشین به نام‌های ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG) و ماشین سنکرون آهنربای دائم (PMSM) استفاده شده است. ژنراتور DFIG در دسته ژنراتورهای سرعت متغیر قرارگرفته و به دلیل تنش مکانیکی کمتر و بازده بیشتر، از آن‌ها بسیار استفاده می‌شود. یکی از مزایای مهم این ژنراتورها، کنترل توان اکتیو و راکتیو است. در این مقاله طراحی نوینی از یک کنترل‌کننده بر اساس استراتژی کنترل پیش‌بین نشان داده شده است که وظیفه آن، کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو ژنراتور القایی دو سو تغذیه مبتنی بر سیستم تبدیل انرژی میکرو نیروگاه آبی است. نتایج شبیه‌سازی با Matlab/Simulink و نتایج آزمایشگاهی با پِلت‌فُرم میکروکنترلر STM32F407، مؤثر بودن، مقاوم بودن و دقیق بودن این کنترل‌کننده را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

کنترل‌کننده پیش‌بین توان، ژنراتور القایی دو سو تغذیه، میکرو نیروگاه آبی، کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو

---

۱. کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند.

۲ *. دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، H.R_Najafii@Birjand.Ac.Ir

۳. استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند.

تاریخ دریافت: ۹۵/۸/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۶/۳/۲۵

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.14.1.8]

مقدمه

امروزه برای هر جامعه‌ای، انرژی به‌عنوان پایه اصلی توسعه اقتصادی و اجتماعی شناخته می‌شود (ایلوپج و[1] و همکاران،۲۰۱۵). برخلاف سوخت‌های فسیلی و منابع مبتنی بر انرژی هسته‌ای که اثرات منفی زیست‌محیطی و افزایش وابستگی به واردات را به همراه دارند، منابع انرژی تجدیدپذیر، در به حداقل رساندن اثرات منفی زیست‌محیطی و کاهش وابستگی به واردات انرژی، نقش بسزایی را بازی می‌کنند (ازکان[2] و همکاران،۲۰۱۴). در بین این منابع، نیروگاه‌های برق-آبی به‌عنوان یک منبع پایدار شناخته می‌شوند. نیروی برق‌آبی یا در اصطلاح هیدرو الکتریسیته[3] به انرژی الکتریکی تولیدشده از نیروی آب گفته می‌شود. بیشترین انرژی الکتریسیته که توسط منابع تجدیدپذیر تولید می‌شود، متعلق به برق‌آبی معادل ۸۳٪ است؛ مابقی مربوط به انرژی بادی، خورشیدی و زمین‌گرمایی است (گزارش جهانی،۲۰۱۱). در همین رابطه، پژوهشگران به‌طور گسترده به مسئله مدل‌سازی و کنترل نیروگاه‌های انرژی تجدیدپذیر به‌ویژه آن‌هایی که مربوط به آب و نیروگاه آبی میکرو[4] (تا ۱۰۰ کیلووات) هستند، علاقه‌مند شده‌اند (کیشو ر[5] و همکاران،۲۰۱۴)، (لاغر ی[6] و همکاران،۲۰۱۳)، (والت[7] و همکاران،۲۰۱۲). در مکان‌های مناسب، میکرو نیروگاه برق‌آبی یکی از فن‌آوری‌های مقرون‌به‌صرفه و قابل‌اعتماد از انرژی‌های تجدیدپذیر است. همچنین، مزایای متعددی نسبت به انرژی خورشیدی و بادی، با سطح بالایی از پیش‌بینی دارد. این تکنولوژی، بلندمدت و مقاوم است و سیستم‌های مرتبط با آن به‌آسانی می‌توانند برای بیش از ۵۰ سال دوام داشته باشند (صالحی[8] و همکاران،۲۰۱۴). میکرو نیروگاه‌های برق‌آبی یکی از گزینه‌های در دسترسِ تبدیل انرژیِ سازگار با محیط‌زیست هستند. میکرو نیروگاه‌های برق‌آبی معمولاً در کوه‌ها به‌منظور تأمین برق جوامع روستایی احداث می‌شوند؛ بااین‌حال، آن‌ها عمدتاً از شبکه برق ملّی ایزوله[9] و جدا می‌باشند؛ لذا، آن‌ها نیازمند سیستم‌های مؤثر کنترلی برای اطمینان از پایداری پارامترهایی نظیر فرکانس، ولتاژ خروجی و توان به‌رغم بارگذاری مختلف کاربران هستند. تحقیقات متنوعی در این زمینه انجام شده است؛ به‌طور مثال در (صالحی و همکاران،۲۰۱۰)، کل مجموعه میکرو نیروگاه آبی همراه با ماشین‌های الکتریکی موجود در آن توسط سیستم‌های غیرخطی فازی، مدل‌سازی و کنترل شده است. اگرچه تکنیک فازی پایداری را تضمین می‌کند اما بایستی بیان کرد که محدودیت غیرخطی بودن منجر به محاسبات پیچیده شده است. کنترل ولتاژ ژنراتور القایی روتور قفسی در سیستم میکرو نیروگاه برق‌آبی را (ونگ[10] و همکاران،۲۰۱۱) بررسی کرده‌اند؛ به‌کارگیری این نوع ژنراتور در بارهای سنگین[11] مناسب نیست. (ایون و مانرسکیو[12]،۲۰۱۱) درباره کنترل ولتاژ و فرکانس ژنراتور القایی ایزوله شده در سیستم میکرو برق‌آبی تحقیق کردند. ساختار کنترلی متشکل از یک اینورتر[13] منبع ولتاژ[14] با مدار بار تخلیه[15] در سمت DC آن است. کنترل توان ژنراتور القایی دو سو تغذیه[16] مبتنی بر سیستم تبدیل انرژی میکرو نیروگاه آبی با روش کنترل مستقیم توان را (بربان[17] و همکاران،۲۰۱۰) انجام دادند که البته در این کار، فرکانس یا کلیدزنی متغیر یک نقص به‌حساب می‌آید. کنترل مستقیم توان در یک نیروگاه برق‌آبی کوچک با ژنراتور القایی دو سو تغذیه در (عرب مارکده[18] و همکاران، ۱۳۹۳) نشان داده شده است؛ در این پژوهش از کنترل مود لغزشی استفاده شده است؛ اگرچه این تکنیک کنترلی به‌خوبی توان را کنترل کرده است ولی نوسانات فرکانس بالا محدود نشده‌اند و امکان ناپایداری سیستم در عمل وجود خواهد داشت. همچنین (کیشور و همکاران،۲۰۱۴)، مرور کلی بر روی روش‌های مدل‌سازی و کنترل نیروگاه آبی داشته‌اند. در تمام تکنیک‌های کنترلی مورداستفاده در مقالات فوق پایداری تضمین شده است؛ اما کارآمد و مقاوم بودن این روش‌ها و همچنین دستیابی به پاسخ‌های دینامیکی سریع و از همه مهم‌تر درنظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در این نیروگاه‌ها و مواجه‌شدن با موارد غیرخطی، در این آثار پژوهشی، از

[1] Ilupeju
[2] Ozcan
[3] Hydroelectricity
[4] Micro hydro power plant
[5] Kishor
[6] Laghari
[7] Vallet
[8] Salhi
[9] Isolate
[10] Wang
[11] Heavy load
[12] Ion & Marinescu
[13] Inverter
[14] Voltage source inverter
[15] Dump load
[16] Doubly fed induction generator
[17] Breban
[18] Arab markadeh

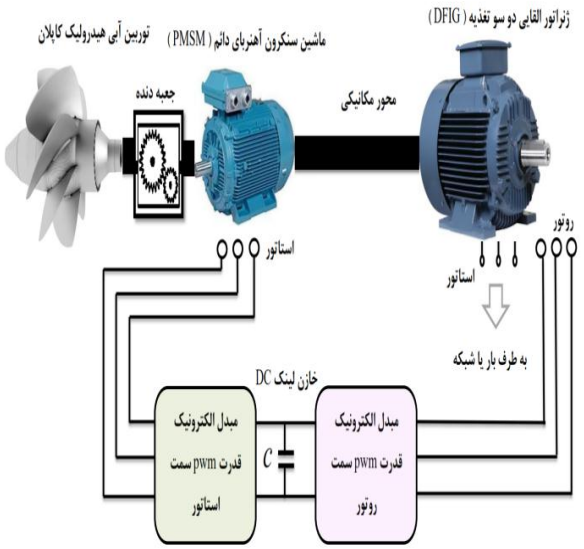
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.14.1.8]

چالش‌های اساسی به‌حساب می‌آیند. ازآنجاکه میکرو نیروگاه آبی یک سیستم غیرخطی است، لذا استفاده از کنترل‌کننده پیش‌بین پیشنهادشده در این مقاله به‌منظور کنترل توان کنترل توان ژنراتور القایی دو سو تغذیه، نقاط ضعف روش‌های کنترلی کلاسیک مانند PID[1] و ... را پوشش می‌دهد.

سیستم تبدیل انرژی میکرو نیروگاه آبی

ساختار پیشنهادی میکرو نیروگاه آبی در شکل ۱ نشان داده شده است. این نیروگاه‌ها عموماً در دسته نیروگاه‌های حرکت رودخانه‌ای[2] قرار می‌گیرند که این امر باعث می‌شود آن‌ها به مخازن آبی مانند سدهای بزرگ نیاز نداشته باشند. تنها بخش کوچکی از جریان آب رودخانه به سمت توربین منحرف می‌شود. این موضوع منجر به یک سازش مفید بین چنین نیروگاه‌هایی با محیط‌زیست می‌شود. در ساختار آن از یک توربین کاپلان نوع پروانه‌ای استفاده شده است. این توربین یک توربین عکس‌العملی با حرکت داخل شونده[3] است که از مفاهیم حرکت محوری و گردشی[4] بهره می‌برد. میکرو نیروگاه آبی عمدتاً مبتنی بر یک ماشین سنکرون سرعت ثابت و یا یک ژنراتور القایی قفس سنجابی است. در اولی، سرعت الزاماً ثابت است و در دومی، سرعت ممکن است در یک محدوده کوچک با توجه به تغییرات تقاضای توان اکتیو و تغییرات امپدانس معادل بار، متفاوت باشد؛ این در صورتی است که ماشین القایی یک شبکه غیرفعال را تأمین کند؛ به این معنا که نیروگاه در حالت جزیره‌ای[5] باشد.

برای هر دو ژنراتور، تنظیم دِبی[6] توربین این اجازه را می‌دهد تا توان اکتیو لازم و کنترل فرکانس، زمانی که نیروگاه به بارهای ایزوله متصل می‌شود، تأمین شوند. توربین مذکور به دلیل سرعت چرخش پایین آن با یک جعبه‌دنده مرتبط است. این توربین، یک ژنراتور القایی دو سو تغذیه را که تحریک[7] آن توسط یک ماشین سنکرون آهنربای دائم(PMSM)[8] در سمت روتور انجام می‌گیرد و بر روی محور مکانیکی یکسان نصب شده است، راه‌اندازی می‌کند. درواقع، PMSM وظیفه بازیافت و یا تأمین توان لغزشی DFIG را عهده‌دار است.



شکل (۱): ساختار پیشنهادی میکرو نیروگاه آبی سرعت متغیر

در رابطه با نحوه عملکرد این ماشین در (مالو ی[9] و همکاران،۲۰۱۵) و برای DFIG در (جواهری فرد[10]،۱۳۹۳)، توضیحات کاملی ارائه شده است. دو مبدل الکترونیک قدرت PWM[11] که به شکل پشت‌به‌پشت قرارگرفته‌اند، این دو ماشین را ازلحاظ الکتریکی به هم مرتبط می‌سازند. مبدل سمت استاتورِ PMSM، ولتاژ لینک خازنی و مبدل سمت روتورِ DFIG، همین ماشین را در بارهای ایزوله شده و یا در شبکه قدرت کنترل می‌کند (بربان[12] و همکاران،۲۰۰۷). این ساختارِ مبتنی بر ژنراتور القایی دو سو تغذیه، با ساختارهایی که در سیستم تبدیل انرژی ژنراتورهای بادی بکار گرفته می‌شود و در آن روتور از طریق مبدل به شبکه متصل است، تفاوت دارد. اطلاعات بیشتر در مورد ساختارهای کلاسیک سیستم تبدیل انرژی میکرو نیروگاه آبی در (انسل[13] و همکاران،۲۰۰۴) داده شده است.

مدل‌سازی میکرو نیروگاه آبی

مدل هر جزء از سیستم به‌گونه‌ای که اثر متقابلی بین عناصر سیستم وجود نداشته باشد در این بخش ارائه می‌شود.

[1] Proportional-integral-derivative controller
[2] Run of river
[3] Inward flow
[4] Axial & radial
[5] Islanded
[6] Rate of flow
[7] Excitation
[8] Permanent magnet synchronous machine

[9] Malloy
[10] Javaheri fard
[11] Pulse width modulation
[12] Brabant
[13] Ansel

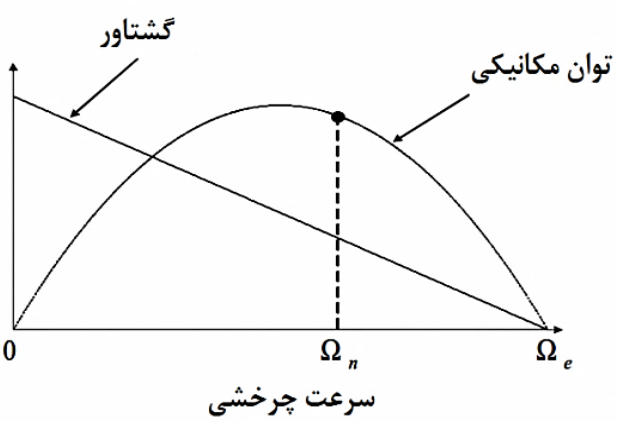
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.14.1.8]

مدل‌سازی توربین پروانه‌ای

برای توربین مذکور، یک مدل ساده درنظر گرفته می‌شود؛ به‌طوری‌که هم کنترل پره‌های قابل تنظیم و هم کنترل زاویه گام[1] پره‌ها، هر دو در اینجا لحاظ نخواهند شد. با توجه به این فرضیات، رفتار توربین برق‌آبی به‌وسیله خصوصیات مکانیکی-استاتیکی که در شکل ۲ ارائه شده است، برای یک دبی ثابت درنظر گرفته می‌شود.

شکل (۲): مشخصه مکانیکی-استاتیکی توربین آبی

گشتاور توربین (T_T) در مقابل مشخصه سرعت (Ω) یک خط



راست فرض می‌شود. گشتاور برای مقدار سرعت چرخشی Ω_e برابر صفر است؛ این سرعت، سرعت مهارگسیخته[2] نامیده می‌شود؛ درواقع همان سرعتی است که اگر گشتاور بار بر محور اعمال نشود، ظاهر می‌شود.Ω_e یک پارامتر توربین و مقدار ۱/۸ برابر سرعت نامی توربین (Ω_n) فرض می‌شود (گزارش سوئیس[3]،۱۹۹۵). رابطه گشتاور در مقابل معادله مشخصه سرعت، تحت جریان آب نامی در زیر داده شده است:

$$T_T = \{1.8-(\Omega/\Omega_n)\}T_n \qquad (۱)$$

زیرنویس n بیانگر مقادیر نامی است. مشخصه ساده‌شده توان مکانیکی (P_M) به شکل یک سهمی است. این توان، از توان هیدرولیکی (P_H) که به‌صورت زیر بیان‌شده است، گرفته می‌شود:

$$P_H = \rho \cdot g \cdot H \cdot q \qquad (۲)$$

که در رابطه فوق، ρ چگالی آب، g شتاب گرانشی، H ارتفاع آب و q دبی آب، هستند.

مدل‌سازی محور مکانیکی

مشتق سرعت الکترومکانیکی مربوطه، منجر به تولید گشتاورهای اعمال‌شده توسط توربین و ماشین‌های الکتریکی به محور خواهد شد که متناظر با رابطه اساسی زیر است:

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{j}(T_T - T_{PMSM} - T_{DFIG}) \qquad (۳)$$

که در رابطه فوق، T_{PMSM} گشتاور PMSM، T_{DFIG} گشتاور DFIG و j ثابت اینرسی تمام قسمت‌های دوار، هستند.

مدل‌سازی ماشین سنکرون آهنربای دائم (PMSM)

ماشین سنکرون با استفاده از روش تبدیل 'Park' در یک قاب مرجع مرتبط با میدان دوار آن مدل‌سازی شده است. لذا، مؤلفه‌های ولتاژ استاتور PMSM به‌صورت زیر هستند:

$$V_{d_{\mathrm{PMSM}}} = R_{\mathrm{PMSM}} I_{d_{\mathrm{PMSM}}} + L_d \frac{dI_{d_{\mathrm{PMSM}}}}{dt} - \omega_{\mathrm{PMSM}} L_q I_{q_{\mathrm{PMSM}}} \qquad (۴)$$

$$V_{q_{\mathrm{PMSM}}} = R_{\mathrm{PMSM}} I_{q_{\mathrm{PMSM}}} + L_q \frac{dI_{q_{\mathrm{PMSM}}}}{dt} + \omega_{\mathrm{PMSM}} (L_d I_{d_{\mathrm{PMSM}}} + \phi_m) \qquad (۵)$$

ولتاژها در دو مؤلفه محور مستقیم یعنی d و محور متعامد یعنی q جداسازی شده‌اند. $I_{d_{\mathrm{PMSM}}}$ جریان استاتور در مرجع d، $I_{q_{\mathrm{PMSM}}}$ جریان استاتور در مرجع q، ω_{PMSM} نوسانات ولتاژ و جریان، R_{PMSM} ، L_d و L_q نیز به ترتیب مقاومت تک‌فاز ماشین، اندوکتانس تکفاز در مرجع d و اندوکتانس تکفاز در مرجع q هستند. همچنین ϕ_m شار تولیدشده توسط آهن‌رباهای روتور است.

گشتاور تولیدشده توسط PMSM نیز به شرح زیر بیان می‌شود:

$$T_{\mathrm{PMSM}} = \frac{3}{2}\mathrm{Np}\{\phi_m I_{q_{\mathrm{PMSM}}} + (L_d - L_q) I_{d_{\mathrm{PMSM}}} I_{q_{\mathrm{PMSM}}}\} \qquad (۶)$$

در رابطه (۶)، Np تعداد جفت قطب‌های ماشین است. این گشتاور، زمانی که سرعت در حالت زیر سنکرون[4] است در برابر حرکت توربین عمل می‌کند و باعث درایو و راه‌اندازی DFIG در حالت فوق سنکرون[5] می‌شود؛ به این معنا که PMSM با توجه

[1] Pitch control
[2] Run-away
[3] Switzerland report
[4] sub-Synchronous
[5] super-Synchronous

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.14.1.8]

به سرعت چرخش می‌تواند به‌صورت یک ژنراتور و یا یک موتور کار کند.

مدل‌سازی ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG)

معادلات ولتاژ و شار در روابط زیر نشان‌دهنده رفتار DFIG در مرجع dq هستند (آرچنا[1] و همکاران،۲۰۱۴):

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_e \phi_{qs} \quad (۷)$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_e \phi_{ds} \quad (۸)$$

$$V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_e - \omega_r)\phi_{qr} \quad (۹)$$

$$V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_e - \omega_r)\phi_{dr} \quad (۱۰)$$

$$\phi_{ds} = L_{ls} I_{ds} + L_m (I_{ds} + I_{dr}) \quad (۱۱)$$

$$\phi_{qs} = L_{ls} I_{qs} + L_m (I_{qs} + I_{qr}) \quad (۱۲)$$

$$\phi_{dr} = L_{lr} I_{dr} + L_m (I_{ds} + I_{dr}) \quad (۱۳)$$

$$\phi_{qr} = L_{lr} I_{qr} + L_m (I_{qs} + I_{qr}) \quad (۱۴)$$

در معادلات فوق، چهار رابطه اول به ترتیب نمایانگر ولتاژ استاتور در مرجع d، ولتاژ استاتور در مرجع q، ولتاژ روتور در مرجع d و ولتاژ روتور در مرجع q می‌باشند. همچنین چهار رابطه آخر یعنی از (۱۱) به بعد نیز به ترتیب بیانگر شار استاتور در مرجع d، شار استاتور در مرجع q، شار روتور در مرجع d و شار روتور در مرجع q هستند. R_s مقاومت استاتور، R_r مقاومت روتور، I_{ds} جریان استاتور در مرجع d، I_{qs} جریان استاتور در مرجع q، I_{dr} جریان روتور در مرجع d، I_{qr} جریان روتور در مرجع q، ω_e سرعت زاویه‌ای سنکرون و ω_r سرعت زاویه‌ای روتور هستند.

توان‌های اکتیو و راکتیو استاتور نیز با روابط زیر بیان می‌شوند:

$$P_s = \frac{3}{2}(V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}) \quad (۱۵)$$

$$Q_s = \frac{3}{2}(V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs}) \quad (۱۶)$$

روش کنترل با جهت‌گیری شار استاتور

درروش کنترل با جهت‌گیری شار استاتور، شار استاتور بر روی محور d قرار می‌گیرد. از این روش برای جداسازی محورهای d و q استفاده می‌کنیم. درنتیجه این امر، تمام شار استاتور بر روی محور d جهت‌گیری می‌شود؛ یعنی،

$$\phi_s = \phi_{ds} = L_{ls} I_{ds} + L_m (I_{ds} + I_{dr}), \quad \phi_{qs} = 0 \quad (۱۷)$$

همچنین در این روش تمام ولتاژ استاتور بر روی محور q جهت‌گیری می‌شود؛ یعنی،

$$V_s = V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_e \phi_{ds}, \quad V_{ds} = 0 \quad (۱۸)$$

لذا ما از این اصل استفاده می‌کنیم و مطابق با آن از روی روابط (۱۱) و (۱۲)، جریان‌های استاتور در مؤلفه‌های عرضی (عمود برهم) و طولی را بازنویسی می‌کنیم:

$$I_{ds} = \frac{1}{L_{ls} + L_m}(\phi_s - L_m (I_{dr})) \quad (۱۹)$$

$$I_{qs} = -\frac{L_m}{L_{ls} + L_m}(I_{qr}) \quad (۲۰)$$

همچنین مطابق باهمین اصل، توان‌های اکتیو و راکتیو در روابط (۱۵) و (۱۶) به شکل زیر تبدیل می‌شوند:

$$P_s = -\frac{3}{2} V_s \left(\frac{L_m}{L_{ls} + L_m}(I_{qr}) \right) \quad (۲۱)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} V_s \left(\frac{1}{L_{ls} + L_m}(\phi_s - L_m (I_{dr})) \right) \quad (۲۲)$$

همان‌طور که در روابط (۱۹) تا (۲۲) ملاحظه می‌شود، جریان-های روتور هم بر روی جریان استاتور و هم بر روی توان‌های اکتیو و راکتیو استاتور منعکس‌شده‌اند؛ بنابراین با کمک کنترل جریان‌های روتور، می‌توان توان‌ها را نیز کنترل کرد.

معادلات سمت روتور

با کمک روابط (۱۳) و (۱۴) و قرار دادن آن‌ها در روابط (۹) و (۱۰)، V_{dr} و V_{qr} بازنویسی می‌شوند. این بازنویسی در معادلات حالت جریان‌های روتور، I_{dr} و I_{qr}، بکار خواهند رفت، لذا:

$$V_{dr} = L_m \frac{d}{dt} I_{ds} + \left(-L_m (\omega_e - \omega_r)\right) I_{qs} + \left(R_r + \left(L_{lr} + L_m\right) \frac{d}{dt} \right) I_{dr} - \left(\omega_e - \omega_r\right)\left(L_{lr} + L_m\right) I_{qr} \quad (۲۳)$$

$$V_{qr} = L_m (\omega_e - \omega_r) I_{ds} + \left(L_m \frac{d}{dt} \right) I_{qs} + \left(R_r + \left(L_{lr} + L_m\right) \frac{d}{dt} \right) I_{dr} + \left(\omega_e - \omega_r\right)\left(L_{lr} + L_m\right) I_{qr} \quad (۲۴)$$

با جایگزینی روابط (۱۹) و (۲۰) در (۲۳) و (۲۴)، معادلات حالت جریان‌های روتور و مدل DFIG به‌دست می‌آیند:

[1] Archna

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.14.1.8]

(۲۵)

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_{dr}}{dt} \\ \frac{dI_{qr}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} a' & b' \\ c' & d' \end{pmatrix} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{-1}{\Upsilon L_m - L_m - L_{lr}} & 0 \\ \frac{-1}{\Upsilon L_m \left(\Upsilon L_m - L_m - L_{lr}\right)}\left(L_m + L_{lr}\right) & \frac{-1}{\Upsilon L_m} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{(\omega_e - \omega_r)}{L_m}\phi_s \end{bmatrix}$$

$$a' = \frac{R_r}{\Upsilon L_m - L_m - L_{lr}} \qquad b' = (\omega_e - \omega_r)$$

$$c' = -(\omega_e - \omega_r) + \frac{1}{\Upsilon L_m}\left(R_r + \left(L_m + L_{lr}\right)\left(\frac{R_r}{\Upsilon L_m - L_m - L_{lr}}\right)\right)$$

$$d' = \frac{2}{\Upsilon L_m}(\omega_e - \omega_r)\left(L_m + L_{lr}\right) \qquad \Upsilon = \frac{L_m}{L_m + L_{ls}}$$

رابطه (۲۵)، یک معادله فضای حالت به‌صورت زیر است:

$$\dot{\bar{X}} = A\bar{X} + B\bar{U}$$
$$\bar{Y} = C\bar{X} \qquad C = I \rightarrow \text{Identity Matrix}\,(2\times 2)$$

طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین برای DFIG

در اینجا به‌منظور طراحی یک کنترل‌کننده پیش‌بین برای DFIG رابطه (۲۵) را به‌صورت زیر گسسته می‌کنیم تا پیاده‌سازی آن در شبیه‌سازی نرم‌افزاری و همچنین شبیه‌سازی بر روی پلت‌فُرم‌های دیجیتالی راحت‌تر انجام گیرد (ونگ[1]،۲۰۰۹):

$$\bar{X}(k+1) = A_d \cdot \bar{X}(k) + B_d \cdot \bar{U}(k) \qquad (۲۶)$$

$$\bar{Y}(k) = C_d \cdot \bar{X}(k) \qquad (۲۷)$$

$$A_d = e^{AT} \cong I + AT \qquad B_d = \int_0^\tau e^{AT} B d\tau \cong BT \qquad C_d = C$$

رابطه (۲۶) را با جابه‌جا کردن زمان‌های نمونه‌برداری در هر دو طرف به شکل رابطه زیر بازنویسی می‌کنیم:

$$\bar{X}(k+1) - \bar{X}(k) = A_d\left(\bar{X}(k) - \bar{X}(k-1)\right) + B_d\left(\bar{U}(k) - \bar{U}(k-1)\right) \qquad (۲۸)$$

در رابطه (۲۸) متغیرهای حالت طرفِ چپ تساوی، طرفِ راست تساوی و متغیرهای کنترلی را به شکل روابط زیر تفکیک و علامت‌گذاری می‌کنیم:

$$\Delta\bar{X}(k+1) = \bar{X}(k+1) - \bar{X}(k)$$
$$\Delta\bar{X}(k) = \bar{X}(k) - \bar{X}(k-1)$$
$$\Delta\bar{U}(k) = \bar{U}(k) - \bar{U}(k-1)$$

اگر $m = 1, 2, \ldots, n_y$ باشد، رابطه (۲۸) با استفاده از روابط بالا به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} &\bar{X}(k+1) - \bar{X}(k) = A_d\left(\bar{X}(k) - \bar{X}(k-1)\right) + \\ &\quad B_d\left(\bar{U}(k) - \bar{U}(k-1)\right) \Leftrightarrow \\ &\bar{X}(k+m) = \bar{X}(k+m-1) + A_d\Delta\bar{X}(k+m-1) + \\ &\quad B_d\Delta\bar{U}(k+m-1) \end{aligned} \qquad (۲۹)$$

رابطه (۲۹) اولین پله از m مقدارِ پیش‌بینیِ متغیرهای حالت را نشان می‌دهد. n_y افق پیش‌بین[2] نام دارد. انتخاب افق پیش‌بین برای عملکرد کنترل‌کننده ضروری است چراکه انتخاب یک مقدار بالا برای این پارامتر، پایداری سیستم را بهبود می‌بخشد اما در عوض ممکن است مقدار محاسبات را بیش‌ازحد افزایش دهد (کاماچو و بوردونز[3]،۲۰۰۴). به‌طورکلی، پیش‌بینی‌ها در طول افق پیش‌بین و افق کنترل[4] n_u، به شکل روابط زیر هستند:

$$\begin{aligned} &\bar{X}(k+1|k) = \bar{X}(k) + A_d\Delta\bar{X}(k) + \\ &\quad B_d\Delta\bar{U}(k) \rightarrow\rightarrow\rightarrow \\ &\bar{X}(k+2|k) = \bar{X}(k) + \{A_d + (A_d \times A_d)\}\Delta\bar{X}(k) + \\ &(I + A_d)B_d\Delta\bar{U}(k) + B_d\Delta\bar{U}(k+1) \rightarrow\rightarrow\rightarrow \\ &\quad \vdots \\ &\quad \vdots \end{aligned} \qquad (۳۰)$$

$$\begin{aligned} &\bar{X}(k+n_u-1|k) = \bar{X}(k) + \left\{\sum_{b=1}^{n_u-1} A_d^b\right\}\Delta\bar{X}(k) + \\ &\left\{\sum_{b=1}^{n_u} A_d^{b-1}\right\}B_d\Delta\bar{U}(k) + \cdots\cdots + B_d\Delta\bar{U}(k+n_u-2) \end{aligned} \qquad (۳۱)$$

در قانون کنترل[5]، حالت $nu = 1$، یعنی رهگیری خروجی‌ها از مقادیر مرجع[6] با دقت پایین انجام می‌گیرد. در حالت $n_u > 1$، استراتژی کنترل، سیگنال‌های کنترلی را تولید می‌کند که باعث می‌شوند خروجی به‌صورت دقیق‌تر مرجع را دنبال کند. انتخاب مقادیر بزرگی از n_u، سیگنال‌های کنترلی زیادی را تولید می‌کند که منجر به افزایش محاسبات ریاضی خواهد شد. در ادامه اگر ماتریس‌های زیر را تشکیل دهیم:

[1] Wang

[2] Predictive horizon
[3] Camacho & Bordons
[4] Control horizon
[5] Control law
[6] References

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.14.1.8]

$$X=\begin{bmatrix}\overline{\mathrm{X}}(k)\\ \overline{\mathrm{X}}(k+1|k)\\ \overline{\mathrm{X}}(k+2|k)\\ \overline{\mathrm{X}}(k+n_u-1|k)\end{bmatrix}\Delta U=\begin{bmatrix}\Delta\overline{\mathrm{U}}(k)\\ \Delta\overline{\mathrm{U}}(k+1|k)\\ \Delta\overline{\mathrm{U}}(k+2|k)\\ \Delta\overline{\mathrm{U}}(k+n_u-1|k)\end{bmatrix}$$

آنگاه خواهیم داشت:

$$X=\begin{pmatrix}0 & 0 & \cdots & 0\\ B_d & 0 & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \left\{\sum_{b=1}^{n_u-1}A_d^{b-1}\right\}B_d & \left\{\sum_{b=1}^{n_u-2}A_d^{b-1}\right\}B_d & \cdots & 0\end{pmatrix}\cdot\Delta U \qquad (۳۲)$$
$$+\begin{pmatrix}\overline{\mathrm{X}}(k)\\ \overline{\mathrm{X}}(k)+A_d\Delta\overline{\mathrm{X}}(k)\\ \overline{\mathrm{X}}(k)+\left\{\sum_{b=1}^{2}A_d^{b}\right\}\Delta\overline{\mathrm{X}}(k)\\ \vdots\\ \overline{\mathrm{X}}(k)+\left\{\sum_{b=1}^{n_u-1}A_d^{b}\right\}\Delta\overline{\mathrm{X}}(k)\end{pmatrix}$$

برای مرتبط کردن $\Delta\overline{\mathrm{X}}(k)$ به خروجی $\overline{\mathrm{Y}}(k)$، بایستی ماتریسی از متغیرهای حالت جدید ایجاد شود اما قبل از انجام این امر، رابطه (۲۸) را به‌صورت رابطه زیر بازنویسی می‌کنیم. لذا،

$$\Delta\overline{\mathrm{X}}(k+1)=A_d\cdot\Delta\overline{\mathrm{X}}(k)+B_d\cdot\Delta\overline{\mathrm{U}}(k) \qquad (۳۳)$$

در رابطه (۳۳) ورودی مدل فضای حالت، $\Delta\overline{\mathrm{U}}(k)$ است. اکنون ماتریس متغیر حالت جدید را ایجاد می‌کنیم:

$$\overline{\mathrm{X}}^{\mathrm{N}}(k)=\begin{pmatrix}\Delta\overline{\mathrm{X}}(k)^{\mathrm{tra}}\\ \overline{\mathrm{Y}}(k)\end{pmatrix} \qquad (۳۴)$$

بالانویس N، بیانگر ماتریس جدید است. لذا، با درنظر گرفتن رابطه (۳۳) و رابطه زیر یعنی (۳۵)، به یک مدل فضای حالتِ جدید در رابطه (۳۶) خواهیم رسید:

$$\overline{\mathrm{Y}}(k+1)-\overline{\mathrm{Y}}(k)=C_d\left\{\overline{\mathrm{X}}(k+1)-\overline{\mathrm{X}}(k)\right\}= \qquad (۳۵)$$
$$C_d\left\{\Delta\overline{\mathrm{X}}(k+1)\right\}=C_d\left\{A_d\Delta\overline{\mathrm{X}}(k)+B_d\Delta\overline{\mathrm{U}}(k)\right\}$$

$$\begin{pmatrix}\Delta\overline{\mathrm{X}}(k+1)\\ \overline{\mathrm{Y}}(k+1)\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}A_d & \mathrm{Z.M}\\ C_d\cdot A_d & I\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\Delta\overline{\mathrm{X}}(k)\\ \overline{\mathrm{Y}}(k)\end{pmatrix}+ \qquad (۳۶)$$
$$\begin{pmatrix}B_d\\ C_d\cdot B_d\end{pmatrix}\Delta\overline{\mathrm{U}}(k)$$
$$\overline{\mathrm{Y}}(k)=\begin{pmatrix}\mathrm{Z.M} & I\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\Delta\overline{\mathrm{X}}(k)\\ \overline{\mathrm{Y}}(k)\end{pmatrix}$$

$$\mathrm{Z.M}=\begin{pmatrix}0 & \cdots & 0\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 0 & \cdots & 0\end{pmatrix}_{O\times O}\qquad I\rightarrow\text{Identity Matrix}(\underbrace{O}_{\text{Output}}\times O)$$

مدل فضای حالت رابطه (۳۶) را می‌توانیم به شکل رابطه زیر بنویسیم؛ لذا خواهیم داشت:

$$\overline{\mathrm{X}}^{\mathrm{N}}(k+1)=\mathrm{A}^{\mathrm{N}}\cdot\overline{\mathrm{X}}^{\mathrm{N}}(k)+\mathrm{B}^{\mathrm{N}}\cdot\Delta\overline{\mathrm{U}}(k)$$
$$\overline{\mathrm{Y}}(k)=\mathrm{C}^{\mathrm{N}}\cdot\begin{pmatrix}\Delta\overline{\mathrm{X}}(k)\\ \overline{\mathrm{Y}}(k)\end{pmatrix} \qquad (۳۷)$$

بر اساس مدل فضای حالت و ماتریس‌های حالت، ورودی و خروجی در رابطه (۳۷)، خروجی‌های آینده به‌صورت متوالی محاسبه خواهند شد.

اطلاعات زمانِ حال فرآیند[1]، با فرض اینکه در زمان نمونه‌برداری k، ماتریس متغیر حالت جدید از طریق اندازه‌گیری در دسترس است، توسط $\overline{\mathrm{X}}^{\mathrm{N}}(k)$ عرضه می‌شود.

مسیر کنترلی آینده[2] به شکل زیر مشخص و تفکیک شده است:

$$\Delta\overline{\mathrm{U}}(k)$$
$$\Delta\overline{\mathrm{U}}(k+1)$$
$$\vdots$$
$$\Delta\overline{\mathrm{U}}(k+n_u-1)$$

با معلوم بودن $\overline{\mathrm{X}}^{\mathrm{N}}(k)$، متغیرهای حالت آینده[3] به تعداد n_y از نمونه‌ها[4] پیش‌بینی می‌شوند.

با تعریف $\Delta\overline{\mathrm{U}}(k+m)=0\qquad m=n_u,...,n_y$، متغیرهای حالت آینده به شکل زیر مشخص و تفکیک می‌شوند:

$$\overline{\mathrm{X}}^{\mathrm{N}}(k+1|k)$$
$$\vdots$$
$$\overline{\mathrm{X}}^{\mathrm{N}}(k+r|k)$$
$$\vdots$$
$$\overline{\mathrm{X}}^{\mathrm{N}}(k+n_y|k)$$

که $\overline{\mathrm{X}}^{\mathrm{N}}(k+r|k)$، متغیر حالت پیش‌بینی‌شده در $k+r$ با اطلاعات زمانِ حال و معلوم فرآیند، $\overline{\mathrm{X}}^{\mathrm{N}}(k)$، است.

متغیرهای حالت آینده به‌صورت متوالی از روابط زیر محاسبه خواهند شد:

[1] Current plant information
[2] Future control trajectory
[3] Future state variables
[4] Samples

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.14.1.8]

$$
\begin{aligned}
&\bar{X}^N(k+1|k) = \\
&A^N \cdot \bar{X}^N(k) + B^N \cdot \Delta\bar{U}(k) \rightarrow\rightarrow\rightarrow \\
&\bar{X}^N(k+2|k) = \\
&A^N \cdot \bar{X}^N(k+1|k) + B^N \cdot \Delta\bar{U}(k+1) = \\
&\left(A^N \times A^N\right)\bar{X}^N(k) + \left(A^N \times B^N\right)\Delta\bar{U}(k) + \\
&B^N\Delta\bar{U}(k+1) \rightarrow\rightarrow\rightarrow \\
&\vdots \\
&\vdots \\
&\bar{X}^N(k+n_y|k) = \left(A^N\right)^{n_y}\bar{X}^N(k) + \\
&\left(A^N\right)^{n_y-1}B^N\Delta\bar{U}(k) + \left(A^N\right)^{n_y-2}B^N\Delta\bar{U}(k+1) + \\
&\cdots + \left(A^N\right)^{n_y-n_u}B^N\Delta\bar{U}(k+n_u-1)
\end{aligned}
\qquad (۳۸)
$$

لذا، با کمک رابطه (۳۸) و متغیرهای حالت پیش‌بینی‌شده، متغیرهای خروجی پیش‌بینی‌شده به‌دست می‌آیند:

(۳۹)

$$
\begin{aligned}
&\bar{Y}(k+1|k) = \\
&C^N A^N \cdot \bar{X}^N(k) + C^N B^N \cdot \Delta\bar{U}(k) \rightarrow\rightarrow\rightarrow \\
&\bar{Y}(k+2|k) = \\
&C^N A^N \cdot \bar{X}^N(k+1|k) + C^N B^N \cdot \Delta\bar{U}(k+1) = \\
&\left(C^N \times A^N \times A^N\right)\bar{X}^N(k) + \left(C^N \times A^N \times B^N\right)\Delta\bar{U}(k) \\
&+\left(C^N \times B^N\right)\Delta\bar{U}(k+1) \rightarrow\rightarrow\rightarrow \\
&\vdots \\
&\vdots \\
&\bar{Y}(k+n_y|k) = C^N\left(A^N\right)^{n_y}\bar{X}^N(k) + \\
&C^N\left(A^N\right)^{n_y-1}B^N\Delta\bar{U}(k) + \\
&C^N\left(A^N\right)^{n_y-2}B^N\Delta\bar{U}(k+1) + \\
&\cdots + C^N\left(A^N\right)^{n_y-n_u}B^N\Delta\bar{U}(k+n_u-1)
\end{aligned}
\qquad (۴۰)
$$

متغیرهای پیش‌بینی‌شده با درنظر گرفتن اطلاعاتِ زمان حال متغیر حالت $\bar{X}^N$ و جابه‌جایی لحظات نمونه‌برداری در زمان آینده $\Delta\bar{U}(k+m) \quad m = 0,1,2,\ldots n_u-1$، تنظیم و قاعده‌گذاری شده‌اند. در ادامه ماتریس خروجی را به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم؛ ابعاد این ماتریس برای یک سیستم چند ورودی-چند خروجی داده شده است.

$$
Y = \begin{bmatrix} \bar{Y}(k+1|k) \\ \bar{Y}(k+2|k) \\ \vdots \\ \bar{Y}(k+n_y|k) \end{bmatrix}^{\text{tra}}_{2n_y \times 1}
$$

بنابراین با استفاده از گردآوری دو رابطه (۳۹) و (۴۰) باهم و در یک قالب خواهیم داشت:

(۴۱)

$$
Y = \begin{pmatrix} C^N A^N \\ C^N\left(A^N\right)^2 \\ \vdots \\ C^N\left(A^N\right)^{n_y} \end{pmatrix}\underbrace{\begin{pmatrix} \Delta\bar{X}(k) \\ \bar{Y}(k) \end{pmatrix}}_{\bar{X}^N(k)} + b''\underbrace{\begin{pmatrix} \Delta\bar{U}(k) & \cdots & \Delta\bar{U}(k+n_u-1|k) \end{pmatrix}}_{\Delta\bar{U}}
$$

$$
b'' = \begin{pmatrix}
C^N B^N & 0 & 0 & \cdots & 0 \\
C^N A^N B^N & C^N B^N & 0 & \cdots & 0 \\
\vdots & & & & \\
\vdots & & & & \\
C^N\left(A^N\right)^{n_y-1}B^N & C^N\left(A^N\right)^{n_y-2}B^N & C^N\left(A^N\right)^{n_y-3}B^N & \cdots & C^N\left(A^N\right)^{n_y-n_u}B^N
\end{pmatrix}
$$

و یا:

$$
Y = E \cdot \bar{X}^N(k) + b'' \cdot \Delta U \qquad (۴۲)
$$

درنهایت، تابع هدف که در هرلحظهٔ نمونه‌برداری مینیمم خواهد شد، به شکل یک معیار درجه دوم تعریف می‌شود:

$$
CF = \left\{(Y-w)^{\text{tra}} W_y (Y-w)\right\} + \left\{\Delta U^{\text{tra}} W_u \Delta U\right\} \qquad (۴۳)
$$

در رابطه (۴۳)، $w \in R^{(n_y \times q)\times 1}$ بیانگر بردار مرجع‌های خروجی آیندهٔ در حالِ کنترل، $W_y \in R^{(n_y \times q)\times(n_y \times q)}$ بیانگر یک ماتریس وزنی مثبت، $W_u \in R^{n_u \times n_u}$ بیانگر یک ماتریس مثبت و معمولاً قطری که سعی کنترلی[1] ورودی‌ها را وزن می‌دهد و q تعداد خروجی‌ها هستند.

نتایج شبیه‌سازی تئوری

برای شروع شبیه‌سازی، پارامترهای هر دو ماشین را به‌صورت جدول ۱ تعیین می‌کنیم:

[1] Control effort

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

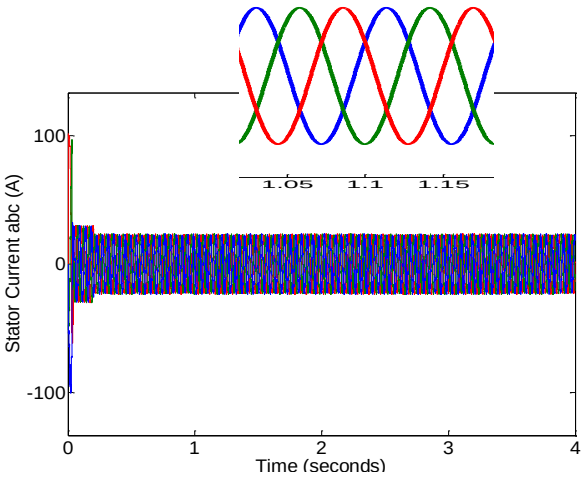
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.14.1.8]

جدول (۱): پارامترهای هر دو ماشین

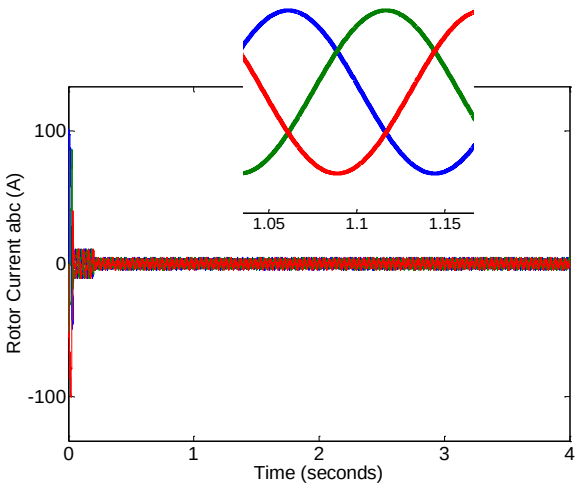
DFIG Parameters		PMSM Parameters
1.44 Ω	R_s	R_{PMSM} *0.86 Ω*
0.33 Ω	R_r	L_d *0.015 H*
0.045 H	L_m	L_q *0.023 H*
0.0145 H	L_{ls}	*j 0.0017 kgm²* *Np 4*
0.0245 H	L_{lr}	
0.0018 kgm²	*j*	
Np 2		

مقادیر مؤثر ولتاژ خط سه‌فاز ۲۲۰ ولت و ولتاژ لینک خازنی نیز ۱۰۰ ولت درنظر گرفته شده است. همچنین زمان نمونه‌برداری برابر ۲۰ میکروثانیه است. مقدار دِبی یا همان نرخ شارش آب ثابت لحاظ می‌شود. شبیه‌سازی سیستم موردنظر در این بخش با Matlab/Simulink انجام می‌گیرد. فرکانس سوییچینگ و نمونه‌برداری، هر دو ۵۰ کیلوهرتز هستند.

در شکل (۳) جریان سه‌فاز استاتور ژنراتور القایی دو سو تغذیه داده شده است. با بسط زمان شبیه‌سازی مثلاً در بازه ۱/۰۵ تا ۱/۱۵ ثانیه، مشخص می‌شود که این جریان کاملاً سینوسی می‌باشد. با بررسی آنالیز فرکانسی در مراحل بعدی می‌توان بهتر به درک این موضوع پرداخت. در شکل ۴ نیز جریان سینوسی سه‌فاز روتور ژنراتور القایی دو سو تغذیه، دیده می‌شود.



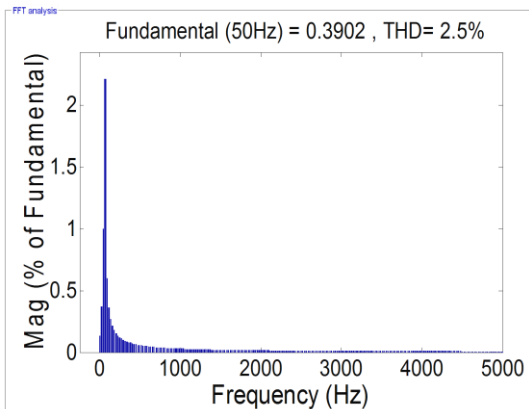
شکل (۳): جریان استاتورِ DFIG (تئوری)



شکل (۴): جریان روتورِ DFIG (تئوری)

باید اشاره کرد که فراجهش در هر دو پاسخ جریان‌های سه‌فاز استاتور و روتور در همان ثانیه‌های ابتدایی میرا می‌شود. در هر دو جریان، نوسان شبکه در زمان ۰/۳ ثانیه ملاحظه می‌شود که به‌سرعت به این مورد پاسخ‌داده‌شده است و این یعنی جریان‌های مذکور پاسخ سریع و مقاومی[1] را از خود نشان می‌دهند که این موضوع وابستگی مستقیم به کنترل‌کننده پیشنهادی و طراحی دقیق پارامترها دارد.

چنانچه آنالیز طیف فرکانسی بر روی جریان تکفاز استاتور و روتور انجام شود، THD[2] یا اعوجاج هارمونیک کل به‌دست می‌آید. این پارامتر کیفی بوده و بیانگر آن است که یک شکل موج یا سیگنال تا چه حد به شکل موج سینوسی نزدیک است.

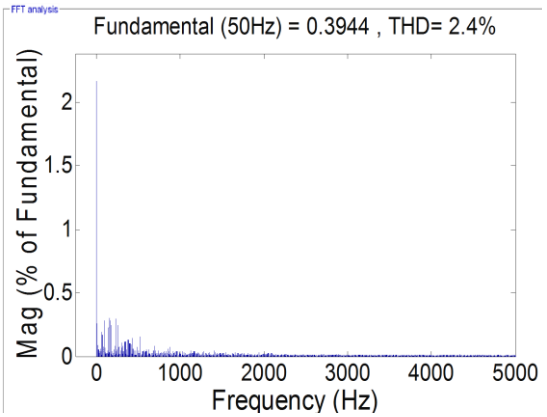


شکل (۵): آنالیز طیف فرکانسی جریان استاتور (تئوری)

[1] Robust
[2] Total harmonic distortion

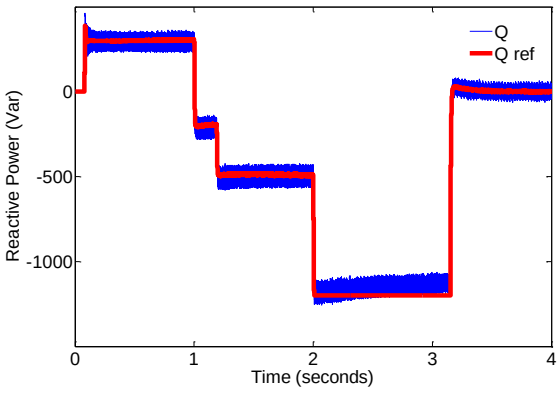
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.14.1.8]

در شکل (۵) که مربوط به جریان تکفاز استاتور ژنراتور القایی دو سو تغذیه است، اعوجاج هارمونیک کل برابر 2.5% است. در شکل (۶) نیز ملاحظه می‌شود که اعوجاج هارمونیک کل برای جریان تکفاز روتور هم برابر است با 2.4%.



شکل (۶): آنالیز طیف فرکانسی جریان روتور (تئوری)

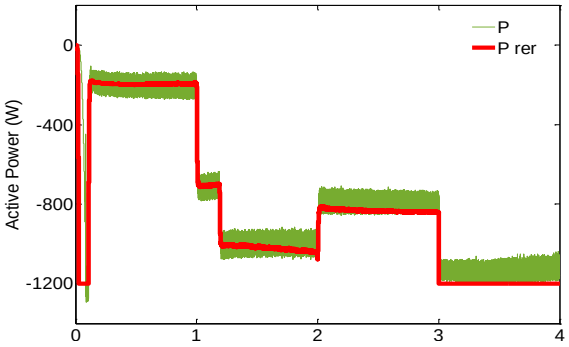
مطالعات با دادن مقادیر مرجع پله‌ای توان اکتیو و راکتیو و به دنبال آن پاسخ دینامیکی استراتژی کنترل‌کننده پیش‌بین پیشنهادی ادامه پیدا می‌کند. در شکل (۷) توان راکتیو DFIG و در شکل (۸) توان اکتیو DFIG داده شده است. توان راکتیو در زمان ۰/۱ ثانیه دارای مقدار ۳۱۰ ولت‌آمپر راکتیو است. از زمان ۰/۱ ثانیه تا زمان ۱ ثانیه، مقدار توان راکتیو، با علامت منفی ۲۰۰- ولت‌آمپر راکتیو می‌شود. در زمان ۱/۳ ثانیه، این توان دوباره کاهش پیدا می‌کند و به مقدار ۵۰۰- ولت‌آمپر راکتیو می‌رسد.



شکل (۷): توان راکتیوِ DFIG همراه با مقادیر مرجع (تئوری)

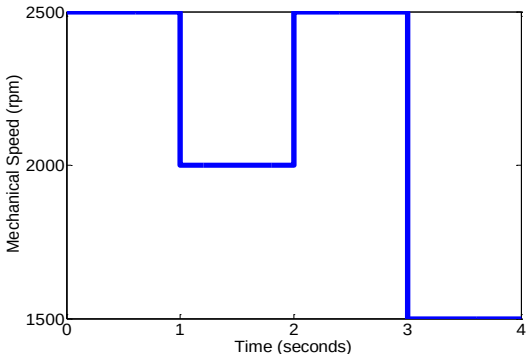
در زمان ۲ ثانیه، توان راکتیو ۱۲۰۰- VAr خواهد شد و درنهایت در زمان ۳/۲ ثانیه مقدار این توان صفر می‌شود و این بدان معنا است که طبق رابطهٔ $Q = V I \sin \varphi$، ضریب قدرت، $\cos \varphi = 1$ می‌شود. مشاهده می‌شود که در تمامی این لحظات توان راکتیو همواره از مقادیر مرجع خود پیروی کرده و آن‌ها را رهگیری می‌کند.

از شکل (۸) نشان می‌دهد که در زمان ابتدای شبیه‌سازی یعنی با شروع در زمان صفر ثانیه، این توان دارای مقدار ۱۲۰۰- وات است و در ۰/۱۵ ثانیه، ۱۹۰- وات می‌شود که تا زمان ۱ ثانیه ثابت است. از زمان ۱/۲ ثانیه، توان اکتیو کمتر شده و تا مقدار ۱۰۰۰- وات هم خواهد رسید و از زمان ۲ ثانیه، توان اکتیو افزایش‌یافته و ۹۰۰- وات می‌شود و درنهایت این توان، ۱۲۰۰- W خواهد شد.



شکل (۸): توان اکتیوِ DFIG همراه با مقادیر مرجع (تئوری)

در اینجا نیز به دلیل اینکه کنترل‌کننده و پارامترها به‌خوبی و دقیق طراحی شده‌اند، توان اکتیو هم با دقت فراوان، مقادیر مرجع خود را رهگیری کرده است. بدیهی است که در هر دو توان، هیچ‌گونه فراجهشی دیده نمی‌شود.



شکل (۹): سرعت مکانیکی میکرو نیروگاه آبی (تئوری)

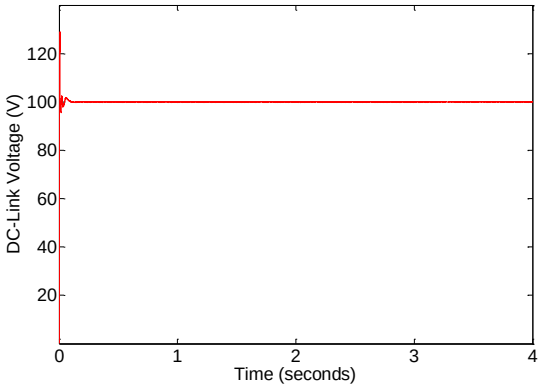
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.14.1.8]

سرعت مکانیکی سیستم میکرو نیروگاه آبی برحسب دور بر دقیقه در شکل (۹) داده شده است. این سرعت همان سرعت شَفت یا محور سیستم است.

توجه داشته باشید که این سرعت متناسب با توان اکتیو ماشین است و بیانگر آن است که ژنراتور القایی دو سو تغذیه به‌درستی در حال کار کردن و بهره‌برداری است. در شکل (۹) دیده می‌شود که سرعت به‌صورت یکنواخت و هموار در زمان‌های موردنظر عکس‌العمل نشان داده و در نواحی فوق‌سنکرون و زیرسنکرون ماشین القایی، مسیر خود را طی می‌کند.

در انتهای کار شبیه‌سازی، ولتاژ لینک خازنی سیستم در شکل (۱۰) داده شده است. نوسان‌های ابتدایی و گذرای ولتاژ به‌سرعت میرا می‌شوند و در ۱۰۰ ولت ثابت می‌شود.



شکل (۱۰): ولتاژ لینک خازنی (تئوری)

این ولتاژ، عملکرد دینامیکی مناسبی را از خود نشان می‌دهد؛ حتی در حالت‌های گذرا هم این ولتاژ به‌طور کامل رفتاری مقاوم و پایدار را از خود بروز می‌دهد، این موضوع ازآنجا ناشی می‌شود که پارامترهای کنترل‌کننده به‌خوبی طراحی شده‌اند.

در بخش بعدی، نتایج آزمایشگاهی برای DFIG مبتنی بر سیستم تبدیل انرژی میکرو نیروگاه آبی آورده شده است.

نتایج شبیه‌سازی عملی

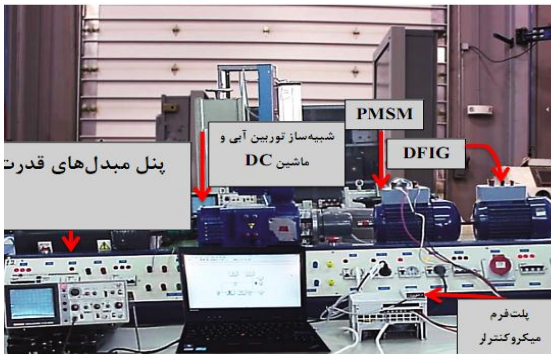
به‌منظور تأیید عملکرد کنترل‌کننده پیش‌بین توان پیشنهادی، تست‌های آزمایشگاهی بر روی یک پِلت‌فُرم بر اساس میکروکنترلر STM32F407 انجام شده است. این میکرو با داشتن قیمت مناسب، قابلیت بسیاری زیادی دارد. این میکرو با فرکانس ۱۶۸ مگاهرتز فعالیت می‌کند، CPU آن cortex-m4 است که مجهز به واحد FPU یا همان واحد انجام محاسبات اعشار می‌باشد. رَم[1] آن ۱۹۲ کیلوبایت و حافظه آن ۱ مگابایت است. واحدهای داخلی میکرو،USART و UART و SPIو USB OTG HOST و PWM و ADC و CAN، شبکه، واحد راه‌اندازی دوربین، MMC کارت حافظه وDAC می‌باشد. این میکرو، حافظه‌های خارجی از قبیل SRAMو فلش و... را قبول می‌کند (البته قابلیت راه‌اندازی DRAM را ندارد). به‌طورکلی این میکروکنترلر دارای قابلیت‌های بسیار زیادی هست که می‌توان در پروژه‌های مختلف از آن استفاده کرد.

مطابق شکل ۱۱، میکرو نیروگاه آبی از ترکیب شبیه‌ساز توربین مبتنی بر یک ماشین DC، یک PMSM و یک DFIG ایجاد شده است. پنل آماده از دو مبدل قدرت، ارتباط بین PMSM و DFIG را برقرار می‌سازد. در اینجا سوئیچ‌های هر دو مبدل توسط پِلت‌فُرم کنترل می‌شوند. پارامترها مشابه حالت قبل هستند. در اینجا همچنان فرکانس سوییچینگ و نمونه‌برداری، هر دو ۵۰ کیلوهرتز هستند.

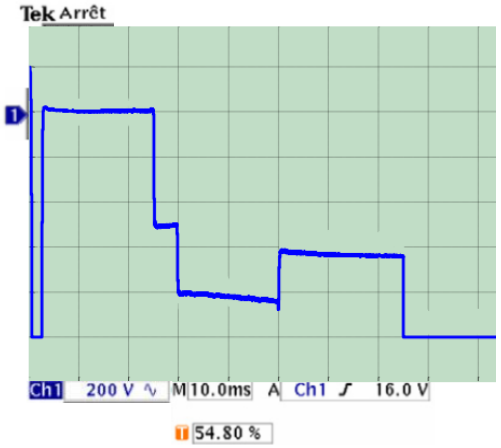
در شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ هموار بودن تقریبی موج‌ها ملموس است. با کاهش زمان نمونه‌برداری، ریپل[2] توان کم خواهد شد. توان‌های اکتیو و راکتیو به‌طور مستقیم با پراب[3] یا کابل قابل‌اندازه‌گیری نیستند، لذا از یک WT1800E که یک آنالیزو ر[4] توان است، استفاده می‌شود؛ این دستگاه، نقش اسیلوسکوپ[5] را نیز دارد.

[1] RAM
[2] Ripple
[3] Probe
[4] Analyzer
[5] Oscilloscope

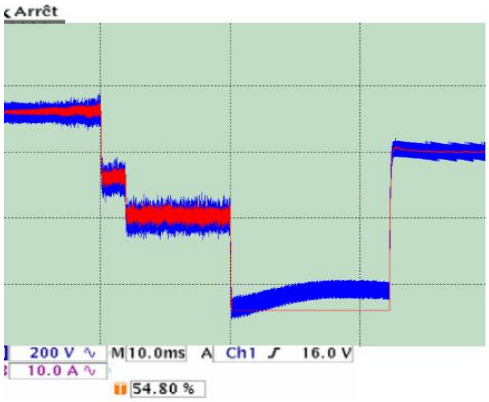
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.14.1.8]



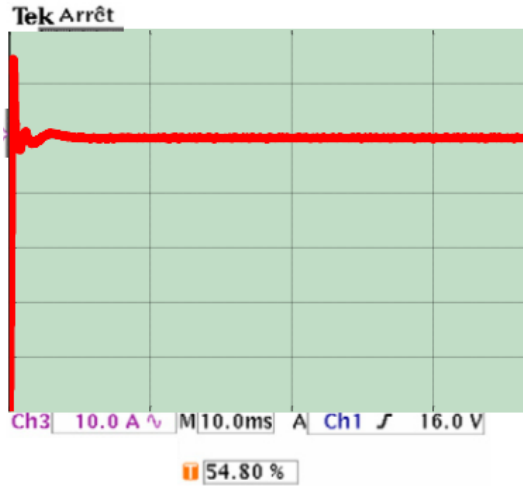
شکل (۱۱): تنظیم سیستم برای انجام آزمایش عملی



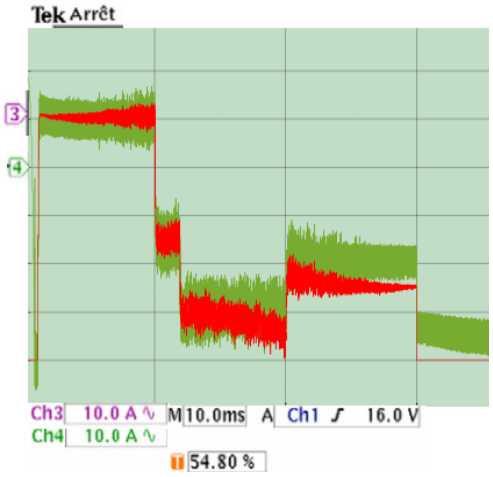
شکل (۱۴): سرعت مکانیکی میکرو نیروگاه ابی (عملی)



شکل (۱۲): توان راکتیوِ DFIG همراه با مقادیر مرجع (عملی)



شکل (۱۵): ولتاژ لینک خازنی (عملی)



شکل (۱۳): توان اکتیوِ DFIG همراه با مقادیر مرجع (عملی)

نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک کنترل‌کننده پیش‌بین به‌منظور کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو یک ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG) که مبتنی بر سیستم تبدیل انرژی میکرو نیروگاه آبی است، با استفاده از جریان‌های مؤلفه d و q روتور طراحی و پیاده‌سازی شد. کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر یک مدل است و برای کنترل توان DFIG به‌سادگی قابل‌اجرا و پیاده‌سازی است. خروجی‌های پیش‌بینی‌شده یعنی توان‌ها توسط مدل فضای حالتِ DFIG محاسبه می‌شوند. سیستم کنترل از یک قانون کنترلی تشکیل شده است که این قانون کنترلی از بهینه-سازی یک تابع هدف استخراج شده است؛ تابع هدف، سعی کنترلی و اختلاف بین خروجی‌های پیش‌بینی و مقادیر مرجع را

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.14.1.8]

درنظر می‌گیرد. کنترل ولتاژ روتور به روش افق دورشونده[1] انجام شده است. کنترل‌کننده پیشنهادی، فرکانس سوئیچینگ ثابتی را اِعمال می‌کند. طراحی کنترل‌کننده توسط نرم‌افزار متلب/ سیمولینک انجام و شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان از مقاوم بودن و مؤثر بودن این روش کنترلی دارد. به‌منظور تأیید عملکرد کنترل‌کننده پیش‌بین پیشنهادی، آزمایش‌های عملی نیز انجام گرفت. پاسخ‌های دینامیکی کاملاً سریع و در برخی پارامترها بدون فراجهش و در برخی دیگر، فراجهش بسیار کم است.

برای کسب اطلاعات بیشتر درباره استراتژی پیش‌بین و کاربردهای آن در صنعت برق رجوع کنید به: مراجع دوم، سوم، دوازدهم و چهاردهم.

قدردانی

این اثر علمی در آزمایشگاه انرژی شرکت فنی-مهندسی نورافشان اجرا شد؛ لذا نویسندگان این مقاله کمال تشکر و سپاس‌گزاری را از شرکت مذکور دارند.

مراجع

۱- جواهری فرد، ح؛ و نجفی، ح. ر. (۱۳۹۳). "استراتژی پیش‌بین در یک توربین بادی با ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG) به جهت کنترل توان با کمک جریان روتور."، *۲۹ کنفرانس بین‌المللی برق PSC*، ۵ تا ۷ آبان ۱۳۹۳، تهران، وزارت نیرو، پژوهشگاه نیرو، مقاله شفاهی.

۲- جواهری فرد، ح. نجفی، ح. ر؛ و الیاسی، ح. (۱۳۹۵). "طراحی و پیاده‌سازی کنترلر پیش‌بین توان بر روی ژنراتور القایی دو سو تغذیه در یک توربین بادی با استفاده از جریان روتور."، *۳۱ کنفرانس بین‌المللی برق PSC*، ۳ تا ۵ آبان ۱۳۹۵، تهران، وزارت نیرو، پژوهشگاه نیرو، مقاله شفاهی.

۳- جواهری فرد، ح. کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل توربین بادی با ژنراتور القایی دو سو تغذیه. *پایان‌نامه*، دانشگاه بیرجند، ۱۳۹۳.

۴- عرب مارکده، غ. الهی، ا. سلطانی، ج. کنترل مستقیم توان در یک نیروگاه برق‌آبی کوچک با ژنراتور القایی دو سو تغذیه. نشریه سد و نیروگاه برق‌آبی. ۱۳۹۳، ۱ (۳)، ۵۲-۶۲.

5- Ansel, A. Biet, M. and Robyns, B. (2004). "Micro hydropower station based on a doubly fed induction generator excited by a PM synchronous machine." *in*: *ICEM* 2004, *Krakow*, *Poland*.

6- Archna, A. Mohan, S. L. and Bhim, S. (2014). "Control Strategies for DFIG Based Grid Connected Wind Energy Conversion System." *International Journal of Grid Distribution Computing*. 7(3), 49-60.

7- Breban, S. Radulescu, M. M. and Robyns, B. (2010). "Direct Active and Reactive Power Control of Variable-Speed Doubly-Fed Induction Generator on Micro-Hydro Energy Conversion System." *XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010*, *Rome*, *IEEE*, 1-6.

8- Breban, S. Nasser, M. Ansel, A. Saudemont, C. Robyns, B. and Radulescu, M. (2007). "Variable Speed Small Hydro Power Plant Connected to AC Grid or Isolated Loads." *EPE Journal*. 17(4), 29-36.

9- Camacho, E. F. and Bordons, A. C. (2004). "Model Predictive Control." *springer*.

10- Ilupeju, S. A. O. Inambao, F.L. Mutombo Ntumba M. Nalubega, T. and Ustun, T.S. (2015). "Sustainable energy generation from pumped hydropower." *Domestic Use of Energy* (*DUE*), *International Conference on the*, *IEEE*, 177-185.

11- Ion, C.P. and Marinescu, C. (2011). "Autonomous micro hydro power plant with induction generator." *Renewable Energy*, *Elsevier*. 36(8), 2259-2267.

12- Javaheri Fard, H. Najafi, H. R. and Eliasi, H. (2015). "Active and Reactive Power Control via Currents of Rotor's *d* and *q* Components with Nonlinear Predictive Control Strategy in Doubly-Fed Induction Generator based on Wind Power System." *Energy Equipment and Systems*. 3(2), 143-157.

13- Javaheri Fard, H. Najafi, H. R. and Heidari, G. (2016). "Design of discrete predictive direct power control strategy on the doubly-fed induction generator based on Micro-Hydro Power Plant with the aim of active and reactive powers control." *21st Conference on Electrical Power Distribution Networks Conference* (*EPDC*), *IEEE*, 118-124.

14- Javaheri Fard, H. Najafi, H. R. and Eliasi, H. (2015). "Design and implementation of the predictive current control strategy in the form of laboratory on single phase photovoltaic grid connected inverter based on microcontroller," *International Journal of Smart Electrical Engineering* (*IJSEE*). 4(3), 161-167.

15- Kishor, N. Saini, R.P. and Singh, S.P. (2007). "A review on hydropower plant models and control." *International Journal of Mechatronics*, *Electrical and Computer Technology*, *Elsevier*. 11(5), 776-796.

16- Laghari, J.A. Mokhlis, H. Bakar, A.H.A. and Hasmaini, M. (2013). "A comprehensive overview of new designs in the hydraulic, electrical equipments and controllers of mini hydro power plants making it cost effective technology." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *Elsevier*. 20, 279-293.

17- Malloy, A.C. Martinez-Botas, R.F. and Lamperth, M. (2015). "Measurement of Magnet Losses in a Surface

[1] Receding horizon

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.14.1.8]

Mounted Permanent Magnet Synchronous Machine." *Energy Conversion, IEEE Trans*. 30(1), 323-330.

18- Ozcan, M. (2014). "Assessment of renewable energy incentive system from investors' perspective." *Renewable Energy, Elsevier*. 71, 425-432.

19- Petites centrales hydrauliques — Turbines hydrauliques, Report of the Renewable Energies Action Program in Switzerland, PACER, 1995.

20- Renewables 2011, Global Status Report: www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/REN21_GSR2011.pdf

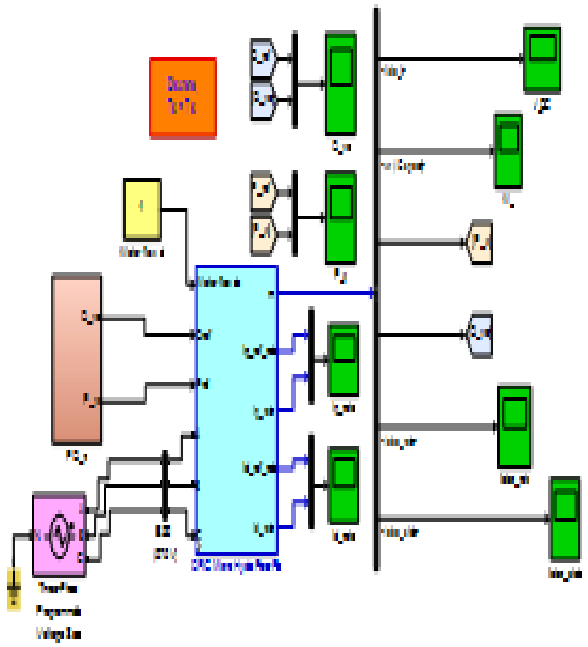
21- Salhi, I. Doubabi, S. Essounbouli, N. and Hamzaoui, A. (2014). "Frequency regulation for large load variations on micro-hydro power plants with real-time implementation." *international Journal of Electrical Power & Energy Systems, Elsevier*. 60(1), 6-13.

22- Salhi, I. Doubabi, S. Essounbouli, N. and Hamzaoui, A. (2010). "Application of multi-model control with fuzzy switching to a micro hydro-electrical power plant." *Renewable Energy, Elsevier*. 35(9), 2071-2079.

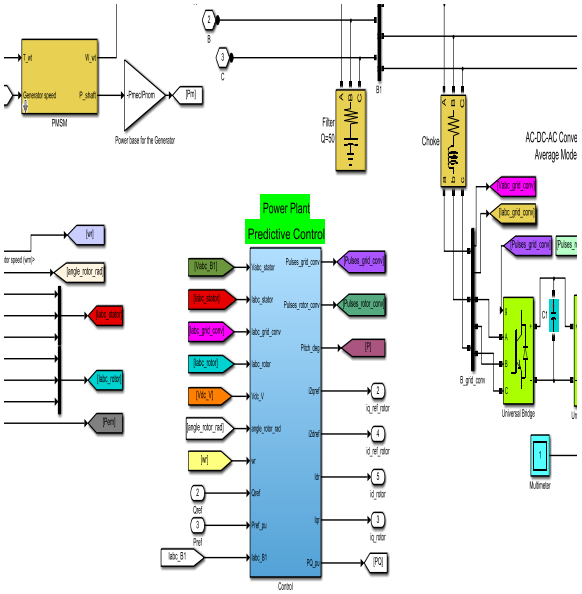
23- Vallet, M. Munteanu, I. Bratcu, A. I. SeddikBacha. and Roye, D. (2012). "Synchronized control of cross-flow-water-turbine-based twin towers." *Renewable Energy, Elsevier*. 48, 382-391.

24- Wang, G. Zhai, Q. and Yang, J. (2011). "Voltage control of cage induction generator in micro hydro based on variable excitation." *Electrical Machines and Systems (ICEMS), International Conference on, IEEE*, 1- 3.

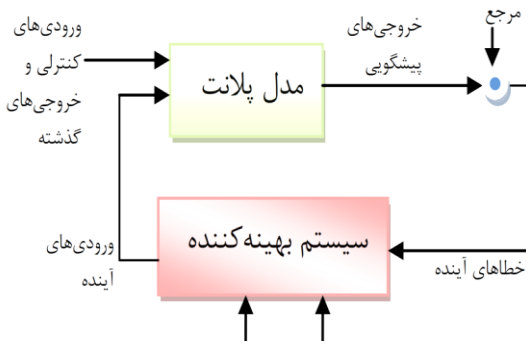
25- Wang, L. (2009). "Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB." *springer*.



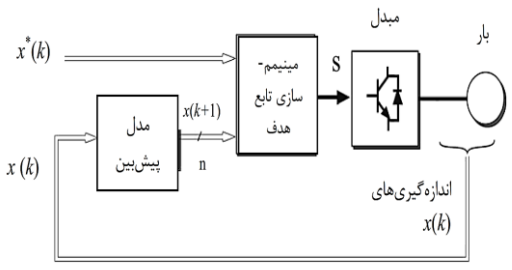
ضمیمهٔ (۱): کل سیستم تبدیل انرژی میکرو نیروگاه آبی مبتنی‌بر DFIG در Matlab



ضمیمهٔ (۲): بخشی از زیرسیستم کنترل‌کننده پیش‌بین در Matlab



ضمیمهٔ (۳): ساختار پایه‌ای کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل



ضمیمهٔ (۴): بلوک کنترل پیش‌بین با توجه به افق پیش‌بین $n_y = 1$

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.14.1.8]