

طراحی و اعتبارسنجی کنترل کننده مقاوم H_∞ برای سیستم بازتبدیل انرژی ترمز در موتورهای بزرگ صنعتی

سینا انصاری^{۱*} و امید سرچمی^۲

۱- کارشناس برق، کارخانه لاستیک بارز کردستان

۲- مدیر اداره الکترونیک، کارخانه لاستیک بارز کردستان

Sina75a@gmail.com

چکیده: این پژوهش یک راه کار جامع برای بازتبدیل انرژی ترمز در موتورهای الکتریکی بزرگ صنعتی ارائه می دهد که باهدف افزایش بهره وری انرژی و پایداری سیستم طراحی شده است. سیستم پیشنهادی از یک مبدل DC/DC نوع Boost جهت شارژ یک بانک باتری از طریق انرژی بازیافتی استفاده می کند. این مبدل با چالش یک ولتاژ ورودی بسیار نوسانی و گسترده (۴۰۰ تا ۱۰۰۰ ولت) مواجه است که پایداری آن را تهدید می کند. برای حل این معضل، یک کنترل کننده مقاوم مبتنی بر تئوری H_∞ توسعه یافته است. این رویکرد کنترلی به طور خاص برای مدیریت هم زمان دو چالش اساسی انتخاب شده است: اول، مدل دینامیکی غیرمینیمم فاز (Non-Minimum Phase) سیستم که طراحی کنترل کننده را پیچیده می سازد و دوم، عدم قطعیت های پارامتری شدید (۴۰٪) در اجزای فیزیکی به دلیل فرسودگی و شرایط عملیاتی متغیر. کنترل کننده طراحی شده با موفقیت پایداری مقاوم (RS)، عملکرد مقاوم (RP) و عملکرد نامی (NP) را به طور هم زمان تضمین می کند. نتایج اعتبارسنجی عملی در محیط صنعتی، نشان دهنده کارایی بالای کنترل کننده در تضمین عملکرد پایدار و قابل اعتماد سیستم، حتی در سخت ترین شرایط کاری، است.

واژه های کلیدی: کنترل H_∞ ، بازتبدیل انرژی ترمز، مبدل بوست، سیستم غیرمینیمم فاز، عملکرد مقاوم

مقدمه

در دنیای صنعتی امروز، کیفیت توان الکتریکی و به ویژه پایداری ولتاژ، از ارکان اصلی بهره وری، ایمنی و استمرار فرایندهای تولید محسوب می شود. صنایع سنگین، نظیر کارخانه های تولید تیر که از تجهیزات حساس الکترونیک قدرت، موتورهای الکتریکی بزرگ و سیستم های کنترل دقیق بهره می برند، به شدت به یک منبع تغذیه پایدار و قابل اطمینان وابسته اند. هرگونه نوسان، افت یا افزایش ناگهانی ولتاژ در شبکه توزیع می تواند منجر به عملکرد نادرست تجهیزات، توقف خطوط تولید، کاهش عمر مفید دستگاه ها و در نهایت، تحمیل زیان های اقتصادی هنگفت شود. کارخانه لاستیک بارز کردستان، به عنوان یکی از واحدهای صنعتی استراتژیک کشور، از طریق پست اصلی خود به شبکه سراسری متصل است که گاهی با اغتشاشات و نوسانات ولتاژ قابل توجهی روبرو می شود. این ناپایداری ها مستقیماً به شین اصلی کارخانه منتقل شده و پایداری کل سیستم داخلی را تهدید می کند. بنابراین، طراحی یک راه کار مهندسی کارآمد برای ایزوله کردن شبکه داخلی کارخانه از این نوسانات، یک ضرورت فنی و اقتصادی انکارناپذیر است. برای مقابله با این چالش، راه کارهای نوینی مبتنی بر ادوات الکترونیک قدرت، موسوم به سیستم های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)، توسعه یافته اند. در این میان، جبران ساز سنکرون استاتیک (STATCOM) به دلیل سرعت پاسخ بسیار بالا، قابلیت کنترل پیوسته و دقیق توان راکتیو، و توانایی تزریق و جذب دینامیک آن، به عنوان یکی از مؤثرترین ابزارها برای تنظیم ولتاژ شناخته می شود. این سیستم با عملکردی شبیه به یک منبع ولتاژ قابل کنترل، می تواند به سرعت هرگونه انحراف ولتاژ از مقدار مطلوب را تشخیص داده و با مدیریت هوشمند توان راکتیو، آن را خنثی کند.

در این مقاله، به طراحی و شبیه سازی یک سیستم کنترلی مبتنی بر STATCOM برای پایداری سازی ولتاژ در پست اصلی کارخانه لاستیک بارز کردستان پرداخته می شود. ابتدا، مدل دینامیکی سیستم قدرت شامل شبکه بالادست، خطوط انتقال و بارهای داخلی کارخانه در محیط نرم افزار MATLAB/Simulink پیاده سازی می شود. سپس، ساختار و استراتژی کنترل STATCOM تشریح شده و در نهایت، عملکرد سیستم تحت سناریوهای نوسان شدید ولتاژ شبکه شبیه سازی و نتایج آن

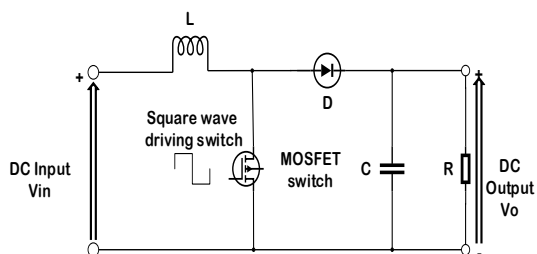
به تفصیل تحلیل خواهد شد تا کارایی این راه حل مدرن در بهبود کیفیت توان و تضمین عملکرد پایدار کارخانه به اثبات برسد.

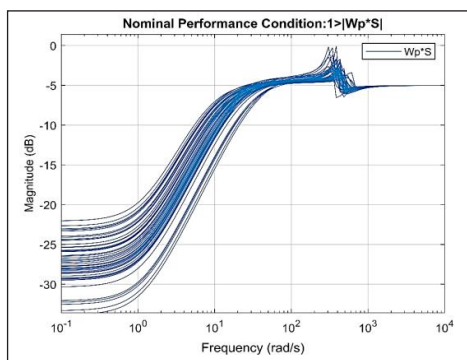
مدل دینامیکی سیستم

مدل دینامیکی مبدل بوست که پایه طراحی کنترل کننده مقاوم را تشکیل می دهد، توسط تابع تبدیل خطی شده از چرخه وظیفه (d) به ولتاژ خروجی (V_o) نمایش داده می شود. این مدل ذاتاً دارای مشخصه غیرمینیمم فاز به دلیل وجود یک صفر غالب در نیم صفحه راست (RHP Zero) است که محدودیت های بنیادین بر عملکرد سیستم اعمال می کند. یک صفر RHP ثانویه و فرکانس بالا (بیش از ۱۰ kHz) به دلیل قرارگیری در خارج از پهنای باند عملکردی، نادیده گرفته شده است. برای تضمین تاب آوری کنترل کننده در محیط صنعتی، مدل نامی با یک عدم قطعیت پارامتری ساختاریافته به میزان $\pm 40\%$ بر روی تمامی ضرایب تابع تبدیل، تقویت شده است. این مقدار، نماینده بدترین حالت تغییرات ناشی از فرسودگی قطعات، رانش دمایی و تغییرات بار است و اساس فرمول بندی مسئله کنترل مقاوم را تشکیل می دهد.

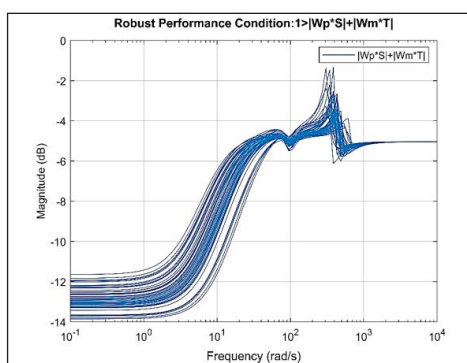
Design Values of the Boost Converter

NO.	Parameters	Design Values
01	Input Voltage, V_{in}	600V (nominal, range 400-1000V)
02	Output Voltage, V_o	1000V
03	Inductance, L	750μH
04	Capacitance, C	30mF
05	Load Resistance, R_{load}	1Ω (approximate for 1MW load)
06	Capacitor Parasitic Resistance, R	0.005Ω
07	Inductor Parasitic Resistance, R_L	0.02Ω
08	Input power, P_{in}	1000kW (1MW)
09	Switch frequency, f	20kHz
10	Nominal duty cycle, d	0.58
11	Maximum allowable voltage ripple, V_{ripple}	0.05

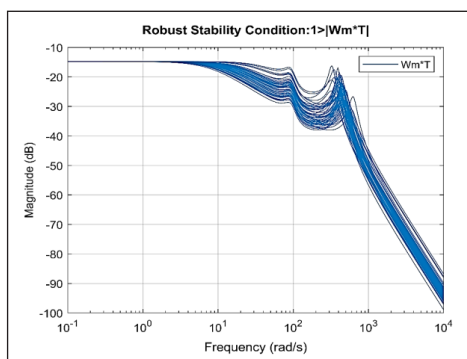




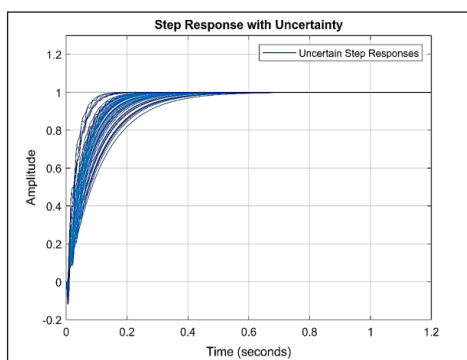
شکل ۱- نمودار شرط عملکرد نامی



شکل ۲- نمودار شرط عملکرد مقاوم



شکل ۳- نمودار شرط پایداری مقاوم



شکل ۴- نمودار پاسخ پله سیستم

$$G = \frac{-1.8 * 10^6 * S + 4.5 * 10^8}{S^2 + 120 * s + 2.2 * 10^5}$$

فرمول‌بندی مسئله کنترل مقاوم با استفاده از توابع وزنی

اساس طراحی کنترل‌کننده H_∞ ، فرمول‌بندی اهداف کنترلی و عدم قطعیت‌های مدل در قالب توابع وزنی فرکانسی است. این توابع، قیود و اولویت‌های طراحی را به زبان ریاضی بیان می‌کنند.

الف) تابع وزنی نامعینی ضربی (W_m) :

این تابع، کران بالای دامنه فرکانسی تمام پلنت‌های محتمل ناشی از عدم قطعیت پارامتری را مشخص می‌کند. برای استخراج یک مدل دقیق از این عدم قطعیت، ابتدا از الگوریتم ucover جهت تولید پروفایل فرکانسی نامعینی استفاده شد. سپس، یک تابع گویای پایدار و مینیمم‌فاز از مرتبه سه به این پروفایل برازش داده شد تا یک پوش محافظه‌کارانه (Conservative Envelope) ایجاد شود. انتخاب مرتبه سه، یک توازن بهینه بین دقت در مدل‌سازی دینامیک نامعینی و جلوگیری از افزایش بی‌دلیل پیچیدگی کنترل‌کننده نهایی است. تابع $W_m(s)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$W_m = \frac{0.16941(S + 23.07)(S^2 + 61.15S + 1.103 * 10^4)}{(S + 26.36)(S^2 + 36.6S + 8952)}$$

ب) تابع وزنی عملکرد (W_p) :

این تابع، الزامات عملکردی حلقه-بسته را تعریف می‌کند. ساختار انتخاب‌شده برای $W_p(s)$ به شکل یک فیلتر پایین‌گذر با بهره بالا در فرکانس‌های پایین است. این ساختار دو هدف کلیدی را دنبال می‌کند:

- بهره بالا در فرکانس‌های پایین (وجود قطب در مبدأ): این ویژگی، سیستم را وادار به داشتن خطای حالت ماندگار صفر در برابر ورودی‌های پله‌ای کرده و قابلیت رهگیری دقیق سیگنال مرجع و حذف اغتشاشات فرکانس-پایین را تضمین می‌کند.
- کاهش بهره در فرکانس‌های بالا: این کار پهنای باند حلقه-بسته را محدود کرده، از اشباع عملگر جلوگیری نموده و سیستم را در برابر نویز سنسور مقاوم می‌سازد.

تابع $W_p(s)$ نهایی به صورت زیر است:

$$W_p = \frac{\frac{1}{M}S + W_s}{S} = \frac{0.5S + 0.59}{S}$$

شروط سه‌گانه طراحی مقاوم:

$$NP \Leftrightarrow |W_p S| < 1, \forall \omega \quad (1)$$

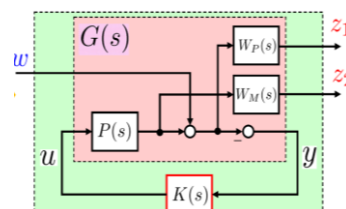
$$RS \Leftrightarrow |W_m T| < 1, \forall \omega \quad (2)$$

$$RP \Leftrightarrow |W_p S| + |W_m T| < 1, \forall \omega \quad (3)$$

طراحی کنترل‌کننده H_∞

برای ارضای هم‌زمان شروط سه‌گانه (۱) تا (۳)، از روش سنتز H_∞ استفاده می‌شود. ساختار بلوک دیگرامی که برای طراحی کنترل‌کننده H_∞ در نظر گرفته‌شده به شکل زیر است:

$$K(s) = \frac{0.0075}{S + 10^{-5}}$$



براساس نمودار شکل‌های ۱ تا ۴ می‌توان مشاهده کرد که هر سه شرط (۱)، (۲) و (۳) به خوبی برآورده شده است.

مراجع

- [1] Q.-C. Zhong and T. Hornik, Control of Power Inverters in Renewable Energy and Smart Grid Integration. Wiley-IEEE Press, 2013.
- [2] Y. Wang, B. Ren and Q. -C. Zhong, "Robust control of DC-DC boost converters for solar systems," 2017 American Control Conference (ACC), Seattle, WA, USA, 2017, pp. 5071-5076, doi: 10.23919/ACC.2017.7963741.
- [3] M. B. Camara, H. Gualous, F. Gustin, A. Berthon, and B. Dakyo, "DC/dc converter design for supercapacitor and battery power management in hybrid vehicle applications —polynomial control strategy," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 2, pp. 587-597, Feb. 2010.
- [4] Y. Gao, L. Qu, D. Li, L. Liu, and M. Chen, "A review of energy recovery technologies for regenerative braking in electric vehicles," Energy Reports, vol. 8, pp. 237-257, Nov. 2022. doi: 10.1016/j.egy.2022.10.369.138.
- [5] R. M. P. de Castro, D. D. C. de Oliveira, and M. A. A. de Oliveira, "Nonlinear H_∞ control for the nonminimum phase boost converter using algebraic derivative estimation," Control Engineering Practice, vol. 119, p. 104981, Feb. 2022. doi: 10.1016/j.conengprac.2021.104981.