

Analiza własności dynamicznych współosiowej przekładni magnetycznej

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę wybranych parametrów dynamicznych współosiowej przekładni magnetycznej. Na bazie zależności analitycznych, wspartych pomiarami na stanowisku doświadczalnym, wyznaczono współczynniki sztywności oraz częstotliwości własne badanych struktur. Stosując techniki aproksymacji wyznaczonych pomiarowo strat mocy, określono współczynniki tłumienia analizowanych wariantów przekładni magnetycznych.

Abstract. The article presents an analysis of selected dynamic parameters of a coaxial magnetic gear. Based on analytical relations, supported by measurements at the laboratory test stand, stiffness coefficients and undamped resonance frequency of the studied structures were analyzed. Using the approximation techniques on the basis of measured power losses, the damping coefficients of the analyzed variants of the magnetic gears were determined. (**Analysis of dynamic properties of a coaxial magnetic gear**).

Słowa kluczowe: przekładnia magnetyczna, sztywność, współczynnik tłumienia, kąt obciążenia

Keywords: magnetic gear, stiffness, dumping factor, load angle

Wstęp

Wysokosprawne przetwarzanie energii elektrycznej i mechanicznej należy współcześnie do najistotniejszych zadań. Troska o środowisko naturalne, rosnące ceny energii i koszty obsługi wymuszają poszukiwanie rozwiązań, wykazujących zbliżone parametry transformacji energii przy jednocześnie wysokiej sprawności i niskich kosztach eksploatacji. Jednym z rozwiązań spełniających ww. wymagania jest współosiowa przekładnia magnetyczna (ang. magnetic gear - MG). Koncepcja tego przetwornika została szczegółowo opisana w pracach [1, 2, 5-7]. Bezstykowego przenoszenie momentu, za pomocą pola magnetycznego, wyklucza mechaniczne zużycie współpracujących elementów, zmęczenie materiału, konieczność smarowania oraz znacząco redukuje poziom drgań i hałasu, a ostatecznie konieczność wykonywania okresowych przeglądów [1-3, 5-8, 10].

Zasada działania przekładni w pewnym aspekcie, zbliżona jest do maszyny synchronicznej. Tak jak w maszynie synchronicznej również przekładnia magnetyczna wymaga synchronizacji. O ile proces ten w trakcie łagodnego rozruchu następuje samoczynnie (tak jak zastosowanie falownika do rozruchu maszyn synchronicznych), wysoka dynamika dotycząca zmian momentu i prędkości w układzie napędowym jest istotnym ograniczeniem możliwości zastosowania magnetycznej transformacji momentu. Relatywnie niska wartość współczynnika sztywności przekładni magnetycznej niejednokrotnie może prowadzić do powstawania słabo tłumionych oscylacji, do utraty synchronizmu i zatrzymania układu [3, 4]. Dla niektórych aplikacji, takie naturalne zabezpieczenie przed przeciążeniem stanowi istotną zaletę, jednak w innych przypadkach może spowodować utratę kontroli nad układem napędowym, a w skrajnym przypadku jego zniszczenie [3, 4]. Jednym ze sposobów na ograniczenie tego niekorzystnego zjawiska jest zaproponowane w pracy [4] wprowadzenie współczynników korekcyjnych. Inne rozwiązanie opisane w pracach [3, 10, 11, 12] bazuje na zastosowaniu specjalizowanych algorytmów sterowania z wykorzystaniem układu sprzężenia zwrotnego dla prędkości i pozycji. Wysoki stopień złożoności takiego układu stanowi jednak istotne ograniczenie aplikacyjne.

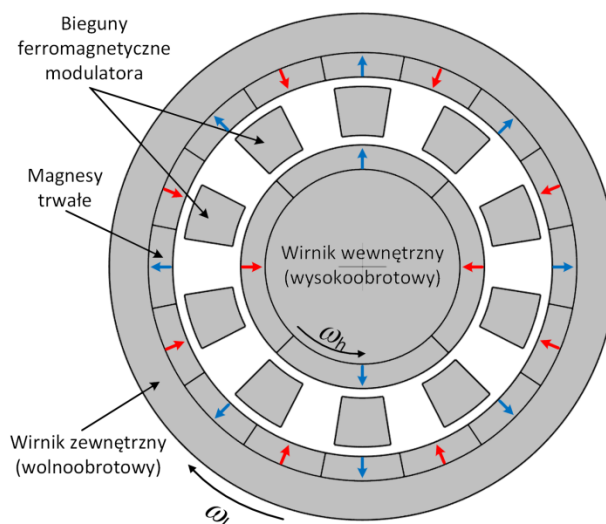
Autorzy niniejszej pracy koncentrują się głównie na przedstawieniu sposobu wyznaczania parametrów istotnych w ocenie dynamicznych właściwości przekładni magnetycznej. Przedstawiono analityczne zależności opisujące częstotliwości rezonansowe elementów

przekładni, współczynniki tłumienia oraz współczynnik sztywności takiego przetwornika momentu obrotowego. Autorzy przedstawili wyniki obliczeń dla dwóch wariantów budowy modulatora wsparte danymi zebranymi w trakcie pomiarów na stanowisku doświadczalnym.

Budowa przekładni magnetycznej

Przedstawiona na rysunku 1 współosiowa przekładnia magnetyczna posiada odpowiednio dwie i osiem par biegunów na wirniku wysoko i wolnoobrotowym ($p_h=2$, $p_l=8$). Pole magnetyczne tych wirników modulowane jest przez dziesięć stacjonarnych biegunów ferromagnetycznych ($n_s=10$). Taka interakcja pozwala na uzyskanie przełożenia 4:1. Zależność opisującą przełożenie przekładni magnetycznej przedstawia równanie (1), znak minus informuje o przeciwnym kierunku wirowania obu wirników [5-7].

$$(1) \quad i_r = -\frac{p_l}{p_h}$$



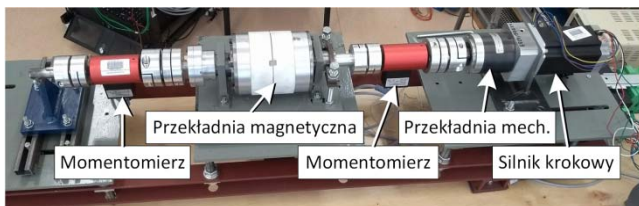
Rys.1. Budowa przekładni magnetycznej

Do budowy obu wirników zastosowano magnesy neodymowe NeFeB o indukcji remanencji $B_r = 1.21T$ i natężeniu koercji $H_c = 860kA/m$ oraz montażu powierzchniowym. Ze względu na stosunkowo niewielkie wymiary i graniczne prędkości pracy nie stosowano segmentacji. Stacjonarny charakter pola magnetycznego

w wirniku wewnętrznym pozwolił na zastosowanie do jego budowy litej stali konstrukcyjnej. Jarzmo wirnika zewnętrznego, ze względu na znaczne fluktuacje pola magnetycznego związane z oddziaływaniem modulatora, wykonano z pakietu blach elektrotechnicznych M400-50A.

Najtrudniejszym do wykonania elementem przekładni jest modulator, gdyż w trakcie pracy poddawany jest działaniu największych sił. Konieczne jest zatem zapewnienie jego dużej wytrzymałości mechanicznej w połączeniu z dobrymi własnościami magnetycznymi. Dodatkowo priorytetem w jego budowie jest zapewnienie separacji magnetycznej od pozostałych elementów konstrukcyjnych przekładni. W pracy autorzy koncentrują się na dwóch wariantach materiałowych modulatora, wykonanego ze stali konstrukcyjnej o wysokiej wytrzymałości mechanicznej oraz kompozytu magnetycznego (SMC) znacznie bardziej podatnego na uszkodzenia mechaniczne.

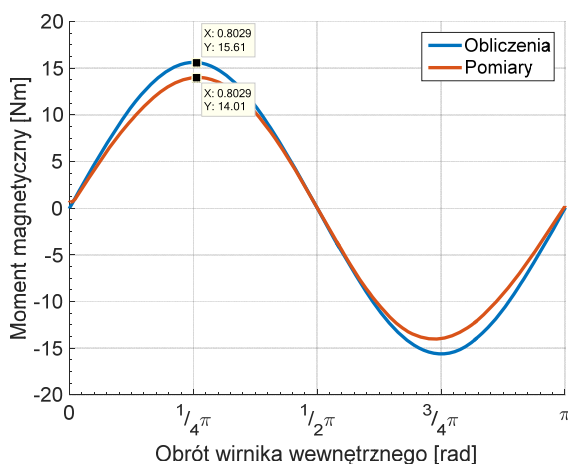
Stosownie do geometrii przedstawionej na rysunku 1 autorzy przygotowali dwuwymiarowe modele polowe w środowisku MATLAB, na bazie których wyznaczono momenty magnetyczne dla poszczególnych elementów przekładni (rys. 3.), istotne w dalszych rozważaniach. Porównanie obliczonych wartości maksymalnych momentów charakteryzujących poszczególne wirniki z pomiarami wykonanymi na stanowisku doświadczalnym (rys. 2.) zawarto w tabeli I. Wpływ materiału użytego do budowy modulatora rozpatrywanej przekładni magnetycznej (stal konstrukcyjna lub SMC), w obliczeniach momentów statycznych jest prawie niezauważalny, pomimo różnic we właściwościach magnetycznych.



Rys. 2. Stanowisko do pomiaru charakterystyk statycznych

Tabela 1. Porównanie obliczeń i pomiarów momentów

Moment magnetyczny	Obliczenia [Nm]	Pomiar [Nm]
Wirnik wewnętrzny	3,90	3,50
Wirnik zewnętrzny	15,61	14,01
Modulator	19,51	17,51



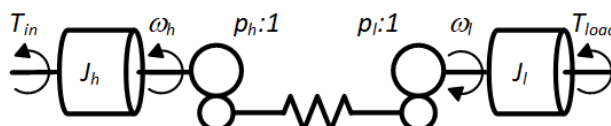
Rys.3. Zmienność momentu magnetycznego dla wirnika zewnętrznego

Dynamiczny model przekładni magnetycznej

Graficzną reprezentację układu magneto-mechanicznego przedstawiono na rysunku 4. Równania (2) i (3) opisujące stany dynamiczne przekładni magnetycznej muszą wiązać ze sobą zarówno wielkości mechaniczne tj. momenty bezwładności i współczynniki tarcia odpowiednio wirników wolno i wysokoobrotowego J_l , k_l , J_h , k_h , momenty napędowy T_{in} i obciążenia T_{load} , z momentami magnetycznymi wirników T_l i T_h [4, 8, 10].

$$(2) \quad J_l \frac{d\omega_l}{dt} = T_l - T_{load} - k_l \omega_l$$

$$(3) \quad J_h \frac{d\omega_h}{dt} = T_{in} - T_h - k_h \omega_h$$



Sprzężenie magnetyczne

Rys. 4. Graficzna reprezentacja modelu mechanicznego przekładni magnetycznej

Równania te muszą również zawierać zależność ujmującą względne przesunięcie kątowne pomiędzy wirnikami (φ_l , φ_h) oraz współczynnik wynikający z parametrów geometrycznych i materiałowych przekładni określający maksymalną wartość przenoszonego momentu T_{lmax} . Można go wyznaczyć na podstawie charakterystyki statycznej momentu magnetycznego (rys. 3). Po uzupełnieniu równania (2) i (3) przyjmują postać:

$$(4) \quad J_l \frac{d\omega_l}{dt} = T_{lmax} \cdot \sin(\varphi_l + \varphi_h) - T_{load} - k_l \omega_l,$$

$$(5) \quad J_h \frac{d\omega_h}{dt} = T_{in} - \frac{T_{lmax}}{i_r} \cdot \sin(\varphi_l + \varphi_h) - k_h \omega_h,$$

gdzie: $\varphi_l = p_l \cdot \theta_l$ i $\varphi_h = p_h \cdot \theta_h$.

Rozwiązanie układu równań (4-5) zlinearyzowanego wokół wybranej wartości kąta obciążenia przedstawiono w pracach [8] i [10]. Wstępna ocena własności dynamicznych przekładni jest możliwa już po wprowadzeniu współczynnika sztywności K_{es} . Dla wirnika wolnoobrotowego, po linearyzacji względem początku układu współrzędnych, wartość tego współczynnika może być opisana zależnością (6), jako pochodna momentu magnetycznego (T):

$$(6) \quad K_{es} = \frac{\partial T}{\partial \theta} = \left. \frac{\partial T_{lmax} \sin(p_l \theta)}{\partial \theta} \right|_{\theta=0} = p_l \cdot T_{lmax}$$

Czynnikiem decydującym o sztywności jest również parametr ściśle związane z budową przekładni – liczba par biegunów. Nie bez znaczenia pozostaje jednak parametr związany z obciążeniem przekładni. Szczegółową analizę wpływu kąta obciążenia na sztywność K_{es} i częstotści rezonansowe wirników (ω_{0l} , ω_{0h}) przekładni przedstawiono w pracy [4]. Autorzy wymienionej pracy stosując rozwinięcie w szereg Taylora wokół zadanego punktu obciążenia φ_0 , przedstawili zależności analityczne pozwalające na precyzyjne określenie częstotliwości rezonansowych wirników oraz współczynników tłumienia (ξ_l , ξ_h). Równania opisujące te wielkości przedstawiono poniżej [4]:

$$(7) \quad \begin{cases} \omega_{0l} = \sqrt{\frac{K_{es} \cos(\varphi_o)}{J_l}} \\ \xi_l = \frac{k_l}{2} \sqrt{\frac{1}{J_l K_{es} \cos(\varphi_o)}} \end{cases}$$

$$(8) \quad \begin{cases} \omega_{0h} = \sqrt{\frac{K_{es} \cos(\varphi_o)}{J_h i_r^2}} \\ \xi_h = \frac{k_h}{2} \sqrt{\frac{i_r^2}{J_h K_{es} \cos(\varphi_o)}} \end{cases}$$

Analiza rozwiązań analitycznych zdaniem autorów prac [3, 4] wskazuje na konieczność zwracania szczególnej uwagi na aplikację przekładni magnetycznych ze względu na stosunkowo niską wartość współczynnika sztywności.

Istotnym parametrem jest również przełożenie przekładni. Relatywnie duża wartość przełożenia istotnie zwiększa różnicę pomiędzy częstotliwościami własnymi wirników i wpływa na wartość współczynnika tłumienia. Znajomość częstotliwości rezonansowych przetwornika umożliwia podjęcie odpowiednich kroków zaradczych podczas sterowania układem napędowym z przekładnią magnetyczną.

Wyniki obliczeń

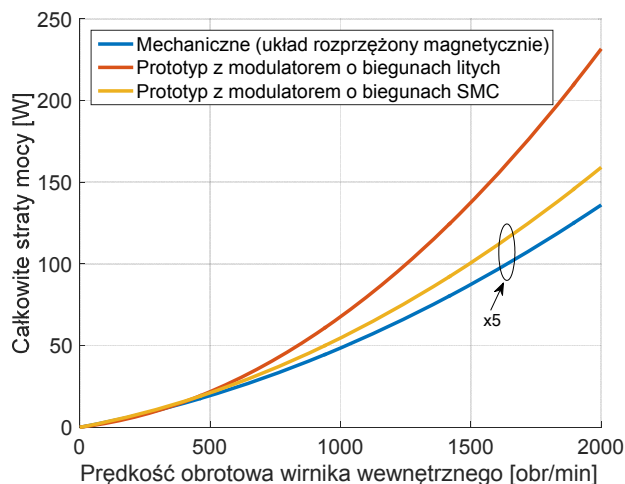
Zależności analityczne przedstawione we wcześniejszej części pracy wymagają wyznaczenia szeregu parametrów. W dalszej części pracy autorzy przedstawiają analizę porównawczą dla ww. kluczowych parametrów przekładni bazującą na symulacjach komputerowych oraz doświadczeniach na obiektach rzeczywistych (rys. 4). W pierwszym podejściu autorzy opierają się jedynie na wynikach obliczeń numerycznych momentu magnetycznego w środowisku MATLAB, i momentach bezwładności wyznaczonych za pomocą oprogramowania CAD. Współczynniki opisujące straty pochodzenia mechanicznego z tytułu tarcia w łożyskach wyznaczono metodą pomiarową w układzie rozprężonym magnetycznie. W drugim podejściu do obliczeń przyjęto dane uzyskane z pomiarów momentu statycznego i aproksymacji matematycznej wyników pomiaru strat w stanie jałowym. Takie podejście pozwoliło na uwzględnienie dodatkowych strat związanych z prądami wirowymi i histerezą magnetyczną.

Bazując na aproksymacji danych uzyskanych z pomiarów można dokonać podziału strat na czynnik związany z tarcie lepkiem oraz Coulombowskim. Stosując taką klasyfikację, straty mechaniczne można opisać wzorem (9) [5]:

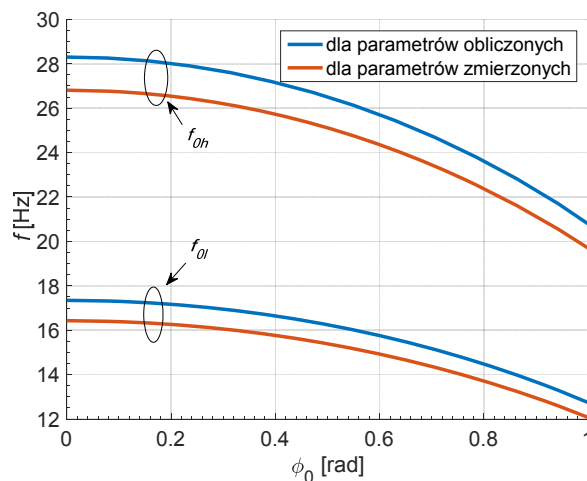
$$(9) \quad p_{Mech} = k_c \omega + k_v \omega^2$$

Analogicznie, proces rozdziału strat można powtórzyć dla układu sprzężonego magnetycznie. Wyróżniony wtedy czynnik liniowo zależny od prędkości informować będzie o wartości sumy strat histerezy i Coulombowskich. Czynnik zależny od prędkości w kwadracie można utożsamiać z sumą strat wirowych i strat z tytułu tarcia lepkiego. Redukując stopień równania (9), przechodząc na momenty, składnik stały k_c może zostać włączony w moment obciążenia a widoczny w równaniach (2-5) pozostanie jedynie składnik k_v zależny liniowo od prędkości. Na rysunku 5 przedstawiono charakterystyki strat dla trzech rozpatrywanych wariantów. Na wykresie wyszczególniono osobno straty mechaniczne oraz całkowite straty dla dwóch wariantów modulatorów. Znacznie wyższy poziom strat w przekładni magnetycznej posiadającej modulator z litej stali wynika z dużej

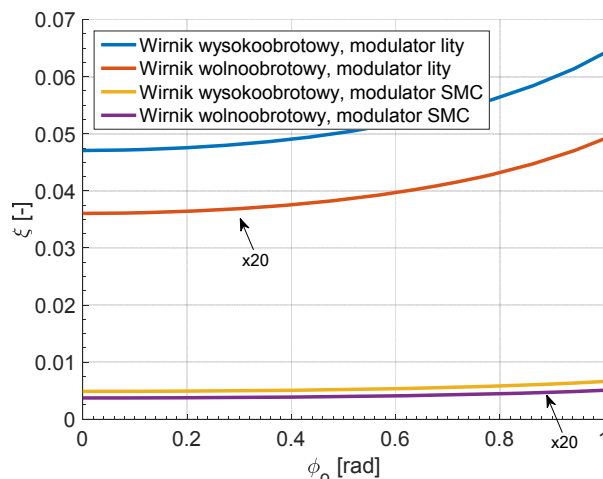
zmienności pola magnetycznego w modulatorze skutkującej powstawaniem prądów wirowych.



Rys. 5. Całkowite straty mechaniczne w funkcji prędkości obrotowej



Rys. 6. Zależność częstotliwości rezonansowych od kąta obciążenia



Rys. 7. Zależność współczynnika tłumienia od kąta obciążenia

Relatywnie mała wartość konduktywności materiału SMC ($\sigma = 2500\text{S/m}$) pozwala praktycznie całkowicie wyeliminować straty w rdzeniu. O ile na wartość częstotliwości rezonansowych wirników (rys. 6.) wpływ mają jedynie obciążenie, współczynnik sztywności i moment

bezwładności, a o wartości tłumienia w dużej mierze decyduje czynnik reprezentujący straty. Modulator z litej stali, pomimo negatywnego wpływu na sprawność przekładni magnetycznej, jednocześnie znacznie poprawia szybkość tłumienia niebezpiecznych z punktu widzenia stabilności pracy przekładni oscylacji (rys. 7.). Przekładnia magnetyczna zawierająca modulator wykonany z materiału SMC, posiada znacznie wyższą sprawność w całym zakresie obciążeń, jednocześnie jest znacznie bardziej podatna na zakłócenia. Gwałtowne zmiany obciążenia mogą skutkować utratą synchronizmu i niekontrolowanym zatrzymaniem jednego z wirników.

Podsumowanie

Niniejsza praca stanowi wstęp do badań dynamiki posiadanych prototypów przekładni magnetycznej. Dokładna znajomość własności dynamicznych obiektu (przekładni magnetycznej), ma szczególne znaczenie w kontekście aplikacji w układzie napędowym. Przekładnia magnetyczna pracująca w układzie turbiny wiatrowej, po utracie sprzężenia w skrajnym przypadku może doprowadzić do jej zniszczenia. Równie niebezpieczne i trudne do przewidzenia mogą być konsekwencje pracy układu napędowego zawierającego źle zestrojony serwonapęd i przekładnię magnetyczną. Mając na uwadze dalsze badania autorzy przygotowali stanowisko pomiarowe wyposażone w serwonapęd, hamulec proszkowy oraz zaawansowany układ sterowania i akwizycji danych. Przeprowadzono również wstępne pomiary w stanach dynamicznych, które wykazały obecność niebezpiecznych oscylacji momentu i prędkości.

Praca powstała w wyniku realizacji projektu badawczego o nr DEC-2017/01/X/ST7/00943 oraz DEC-2017/01/X/ST7/00953 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki

Autorzy: prof. dr hab. inż. Marian Łukaniszyn, dr inż. Marcin Kowol, dr inż. Janusz Kołodziej, mgr inż. Rafał Gabor, Politechnika Opolska, Instytut Systemów Napędowych i Robotyki, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole,
E-mail: m.lukaniszyn@po.opole.pl, m.kowol@po.opole.pl, ja.kolodziej@po.opole.pl, rafal.gabor@doktorant.po.edu.pl

LITERATURA

- [1] Atallah K., Howe D., A novel high-performance magnetic gear, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, no. 4, July 2001, pp. 2844 – 2846.
- [2] Atallah K., Calverly S.D. and Howe D., Design, analysis and realisation of a high performance magnetic gear, *IEE Proc.-Electr. Pow. Appl.*, vol. 151, no. 2, March 2004, pp. 135-143.
- [3] Bouheraoua M., Atallah K., and Wang J., Design and implementation of an observer-based state feedback controller for a pseudo direct drive, *IET Electr. Power Appl.*, vol. 7, no. 8, pp. 643–653, 2013.
- [4] Desvaux M., Le Goff Latimier R., Multon B., Sire S., and Ben Ahmed H., Analysis of the Dynamic Behaviour of Magnetic Gear with Nonlinear Modelling for Large Wind Turbines, *XXII Int. Conf. Electr. Mach.*, pp. 1332–1338, 2016.
- [5] Kowol M., Kołodziej J., Jagiela M., Łukaniszyn M., Impact of modulator designs and materials on efficiency and losses in radial passive magnetic gear, *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2018.
- [6] Kowol M., Kołodziej J., Łukaniszyn M., Badania symulacyjne przekładni magnetycznej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 1'2016, s. 96-101.
- [7] Kowol M., Kołodziej J., Łukaniszyn M., Optymalizacja pasywnej przekładni magnetycznej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2'2017, s. 78-82.
- [8] Molokanov O., Kurbatov P., Dergachev P. and Alami A., Dynamic model of coaxial magnetic planetary gear, *2015 18th Int. Conf. Electr. Mach. Syst. ICEMS 2015*, pp. 944–948, 2016.
- [9] Paul P., Muszyński R., Wpływ dodatkowych sprzężeń zwrotnych na tłumienie drgań skrętnych w układzie napędowym z połączeniem sprzężystym o dużej dynamice, *Przegląd Elektrotechniczny*, 4'2014, s. 53-58.
- [10] Montague R. G., Bingham C. M., Atallah K., Servo Control of Magnetic Gears, *Mechatronics, IEEE/ASME Trans.*, vol. 17, no. 2, pp. 269–278, 2012.
- [11] Montague R. G., Bingham C. M., Atallah K., Dual-observer-based position-servo control of a magnetic gear, *IET Electr. Power Appl.*, vol. 5, no. 9, pp. 708, 2011.
- [12] R. G. Montague, C. Bingham, and K. Atallah, Magnetic Gear Pole-Slip Prevention Using Explicit Model Predictive Control, *Mechatronics, IEEE/ASME Trans.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–9, 2012.