

REVIEW PERBANDINGAN METODE MEMINIMALKAN TORSI DENYUT PADA OUTER-ROTOR DAN DUAL-STATOR GENERATOR MAGNET PERMANEN FLUKS RADIAL PADA TEKNOLOGI PLTB SKALA KECIL

Adeguna Ridlo Pramurti*, Eka Firmansyah, Suharyanto

Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No. 2 Kampus UGM, Yogyakarta 55281.

*Email: adegunapramurti@gmail.com

Abstrak

Paper ini menyajikan review literature dari metode-metode untuk meminimalkan torsi denyut pada desain outer-rotor generator magnet permanen fluks radial dan dual-stator generator magnet permanen fluks radial. Kedua desain generator magnet permanen fluks radial (GMPFR) diaplikasikan pada pembangkit listrik tenaga angin kecepatan putar rendah dengan didukung struktur multi-pole agar dapat memberi tegangan dan daya keluaran optimal. Kendala kedua desain ini ada pada produksi torsi denyut yang dihasilkan akibat adanya celah udara. Metode yang dibahas untuk mengatasi hal tersebut antara lain pole-arc, desain struktur magnet permanen, stator tooth pairing dan stator displacement. Hasil metode meminimalisir torsi denyut pada kedua desain dibandingkan dan didapat hasil torsi denyut terendah sebesar 0.3 Nm pada desain outer-rotor GMPFR dengan metode desain struktur magnet permanen.

Kata kunci: generator fluks radial, magnet permanen, torsi denyut

1. PENDAHULUAN

Potensi kecepatan angin di Indonesia tergolong rendah, yaitu 3-6 m/s (Haqqi et al., 2013; Pakpahan, n.d.). Oleh karenanya, teknologi pembangkit listrik tenaga angin skala kecil sangat mendukung untuk pengembangan teknologi pembangkit listrik tenaga angin di Indonesia. Selain karena faktor potensi kecepatan angin, pada teknologi ini juga memiliki keuntungan yaitu, biaya murah dan mekanisme sederhana, tetapi justru teknologi ini membuat sistem lebih dapat diandalkan dan kinerjanya efisien untuk mengatasi sumber angin dengan kecepatan rendah (Gyeong-Chan Lee et al., 2013).

Pada teknologi pembangkit listrik tenaga angin skala kecil haruslah tetap dapat menghasilkan tegangan keluaran dan daya keluaran yang besar dan efisien. Maka pada paper ini untuk mendukung hal tersebut digunakanlah generator magnet permanen fluks radial (GMPFR) (Lee and Jung, 2013a, 2013b, 2012).

Akan tetapi meskipun GMPFR ini dengan struktur mekanisnya yang sederhana dan juga memiliki torsi per massa serta daya per volume yang tinggi, tetap saja memiliki kelemahan, yaitu generator magnet permanen ini menghasilkan torsi denyut cukup besar. Efek negatif torsi denyut ini mempengaruhi *cut-in* kecepatan angin, menghasilkan torsi riak, kebisingan dan getaran mekanis (Gyeong-Chan Lee et al., 2014).

Pada paper ini dibahas desain serta metode agar torsi denyut dapat diminimalkan sedemikian rupa. Beberapa metode yang dapat digunakan untuk meminimalkan torsi denyut pada GMPFR antara lain, *stator slot opening* (Hwang et al., 1998; Zhu and Howe, 2000), *pole arc* (Sivachandran et al., 2008), *slot skewing* (Sang-Moon Hwang et al., 2001), magnet skewing (Bianchi and Bolognani, 2002; Lukaniszyn et al., 2004), stator displacement (Lee and Jung, 2012), dan stator tooth pairing (Lee and Jung, 2013a, 2013b). Selanjutnya, dibahas tiap metode untuk dapat mengurangi produksi torsi denyut yang telah ditawarkan pada paper-paper sebelumnya dan dibandingkan untuk pengembangan teknologi massal.

2. METODOLOGI

Efek *slotting* karena variasi reluktansi celah udara pada bagian antara gigi stator dan fluks magnet permanen pada rotor menghasilkan torsi denyut saat rotor bergerak (Gyeong-Chan Lee et al., 2014). Dengan kata lain, torsi denyut dipengaruhi oleh struktur geometri generator. Karenanya pengaruh torsi denyut akan tampak saat torsi awal (Xu et al., 2014).

Dalam kondisi dinamis, nilai torsi denyut dapat disalurkan melalui rotor ke beban. Hal ini berdampak pada kondisi antara lain, kontrol posisi dan kontrol kecepatan, induksi getaran, timbul kebisingan, dan adanya resonansi struktural (Sang-Moon Hwang et al., 2001). Torsi denyut dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$T_{cog} = -\frac{1}{2} \Phi_g^2 \frac{dR}{d\theta_r} \quad (1)$$

Dimana, Φ_g adalah fluktuasi celah udara, dan R adalah nilai reluktansi celah udara.

Pada studi tentang GMPFR ada beberapa desain yang populer, yaitu *inner-rotor*, *outer-rotor*, dan *dual-stator* GMPFR. *Inner-rotor* yaitu ketika posisi rotor terletak di dalam stator, pada kondisi ini struktur mekanik sangat kuat dan kemampuan mesin sangat bagus. Tetapi, karena posisi rotor di bagian dalam dimana magnet permanen terpasang, maka diameternya relatif kecil karena keterbatasan struktural. Keterbatasan ini menyebabkan kesulitan dalam mendapatkan daya output yang tinggi karena luas penampang yang relatif kecil (Gyeong-Chan Lee et al., 2013).

Outer rotor, desain ini memaksimalkan peran rotor yang berada di bagian generator luar agar mendapat luas penampang yang lebar. Hal ini tentu mempengaruhi daya keluaran yang tinggi dan efektif untuk pembangkit listrik tenaga angin skala kecil (Gyeong-Chan Lee et al., 2013; Kilk and Kudrjartsev, 2012; Lee and Jung, 2013a, 2013b, 2012). Sedangkan dual-stator, adalah desain dari *inner-rotor* dan *outer-rotor* yang dikombinasikan untuk mendapatkan manfaat keduanya dan saling menutupi kelemahan masing-masing (Gyeong-Chan Lee et al., 2013; Lee and Jung, 2013a, 2013b, 2012).

Secara garis besar ada dua kategori metode untuk meminimalisasi torsi denyut pada struktur desain generator, yaitu desain stator dan desain rotor (Fei and Zhu, 2013). Pada paper ini lebih membahas desain rotor, terutama pada desain outer rotor magnet permanen. Beberapa metode desain rotor yang umum digunakan meliputi: optimasi lebar magnet rotor (Bianchi and Bolognani, 2002; Fei and Luk, 2010; Wang et al., 2012a; Zhu and Howe, 2000), bentuk magnet (Chen et al., 2010; Dubois et al., 2002; Sang-Moon Hwang et al., 2001), pergeseran kutub magnet (Daohan Wang et al., 2010; Tudorache and Trifu, 2012; Wang et al., 2012b), pemasangan kutub magnet rotor (Fei and Luk, 2010, 2012), pola magnetisasi (Zhu et al., 2005), segmentasi magnet (Lateb et al., 2006), dan *rotor skewing* (Hanselman, 1997; Sang-Moon Hwang et al., 2001).

2.1 Pole Arc

Torsi denyut dipengaruhi oleh susunan jumlah slot stator terhadap lebar magnet permanen (Sivachandran et al., 2008). *Pole-arc* adalah metode merubah besaran sudut magnet permanen terhadap, dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\alpha_p = \frac{\tau_m}{\tau_p} \quad (2)$$

Dimana, τ_m adalah posisi magnet dan τ_p adalah posisi kutub magnet terhadap rotor. Pada fluks radial, agar torsi denyut kecil, maka *pole-arc* pada magnet harus optimal. Hal ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\alpha_{po} = \frac{N-k}{k}, k = 1, 2, 3, \dots, N-1 \quad (3)$$

Dimana, $N = N_c/2p$ dan p adalah jumlah kutub sedangkan N_c adalah kelipatan persekutuan terkecil (KPK) jumlah kutub magnet rotor dan jumlah slot stator. Menurut (Gyeong-Chan Lee et al., 2013), nilai persamaan (3) dipengaruhi kebocoran fluks pada stator. Pada persamaan (3), jika ingin *pole arc* optimal maka harus ada jarak yang besar antara nilai N dan k.

2.2 Desain Struktur Magnet Permanen

Pada metode ini, bentuk permukaan magnet permanen yang menghadap stator diubah bentuk sudutnya, sehingga akan tampak lebih cembung ataupun cekung, bahkan datar. Hal ini bertujuan untuk mengefisiensi reluktansi celah udara karena adanya pengaruh dari gigi stator, slot stator dan fluktuasi magnet rotor. Variabel yang diubah hanya magnet permanen, sedangkan bentuk gigi stator tetap, kemudian dianalisa hasilnya pada pengaruh terhadap produksi torsi denyut.

2.3 Stator Tooth Pairing

Gigi-gigi stator secara selang-seling lebarnya dimodelkan dengan beberapa karakteristik untuk mengurangi celah udara, dengan begitu akan mempengaruhi nilai produksi torsi denyut (Lee and Jung, 2013a, 2013b). Pada setiap pemodelan stator terdapat masing-masing dua ukuran yaitu a dan b , pemodelan ini mempengaruhi besar kecilnya nilai celah udara. Ada 4 stator yang dimodelkan, ukuran a dan b pada setiap stator ditunjukkan pada tabel 1. Hal ini dapat ditunjukkan pada rumus berikut:

$$\sin nN_L \frac{a}{2} + \sin nN_L \frac{b}{2} = 0 \quad (4)$$

Dimana, N_L adalah KPK dari jumlah slot dan jumlah kutub magnet permanen. Dari persamaan 4, nilai a dan b saling berhubungan untuk meminimalisir komponen dominan yang menyebabkan torsi denyut. Seperti ditunjukkan table 1, terdapat variasi nilai a dan b juga jumlah berdasarkan persamaan 4.

Tabel 1. Desain stator tooth pairing

a	b	$\sin nN_L \frac{a}{2}$	$\sin nN_L \frac{b}{2}$	sum
9	9	-1.00	-1.00	-2.00
7.6	10.4	-0.74	-0.74	-1.49
7	11	-0.50	-0.50	-1.00
6.5	11.5	-0.26	-0.26	-0.52

2.4 Stator Displacement

Pendekatan stator displacement pada DS-RFMPG dapat mengurangi produksi torsi denyut dengan cara menempatkan inner stator dan outer stator pada susunan tidak sejajar (Deok-je Bang et al., 2008; Gyeong-Chan Lee et al., 2013). Hal ini dilakukan untuk meredam dampak torsi denyut yang secara matematis dihasilkan oleh jumlah torsi denyut dari inner stator, torsi denyut dari outer stator dan fase torsi denyut. Torsi denyut bisa bernilai nol apabila beda fase adalah 180° (Lee and Jung, 2013b).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pole-Arc

Pada penelitian (Gyeong-Chan Lee et al., 2013) dengan spesifikasi jumlah slot dan kutub masing-masing 36 dan 24, menunjukkan hasil metode pole-arc terhadap perubahan nilai torsi denyut dan tegangan keluaran, seperti ditunjukkan pada tabel 2.

Kekurangan metode ini adalah sulitnya untuk merancang nilai kebenaran dari lebar pole-arc pada magnet permanen. Hal ini disebabkan pada nilai ketebalan celah udara dan slot opening yang harus dipertimbangkan. Jika variasi hasil desain dari pole-arc kecil maka akan mempengaruhi tingginya variasi harmonik torsi denyut. Selain itu, metode ini sulit diterapkan untuk mesin dengan jumlah slot tiap pole yang minim, karena akan hanya akan menghasilkan torsi rendah (Bianchi and Bolognani, 2002).

Tabel 2. Hasil torsi denyut terhadap tegangan keluaran dengan metode pole-arc

Rasio Pole-Arc	Torsi Denyut [Nm]	Tegangan Keluaran [V]
0.64	3.7	170
0.68	2.5	172
0.72	1.6	177.5
0.78	4	184.5
0.83	5.6	190
Rasio Pole-Arc	Torsi Denyut [Nm]	Tegangan Keluaran [V]
0.89	6.2	190.5
0.94	6.7	192

3.2 Desain Struktur Magnet Permanen

Pada penelitian sebelumnya (Gyeong-Chan Lee et al., 2013) dengan desain outer-rotor, juga ditunjukkan perubahan nilai torsi denyut dan tegangan keluaran berdasarkan variasi desain struktur

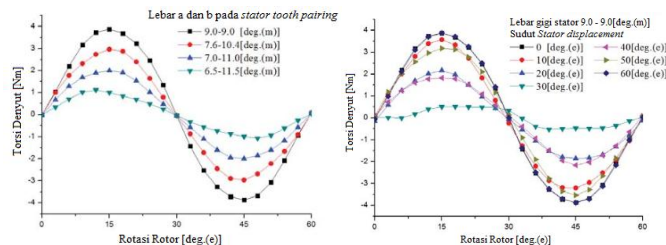
magnet permanen yang dapat dilihat pada table 3. Kekurangan solusi ini yaitu memerlukan beberapa magnet permanen dengan bentuk berbeda untuk rotor yang sama. Maka dari itu solusi ini bisa dikatakan mahal dan dengan investasi tinggi. Walaupun jika dibanding metode *pole-arc* torsi denyut dapat lebih diminimalisir, tetapi tegangan keluaran tidak lebih besar jika dengan solusi *pole-arc*.

Tabel 3. Hasil torsi denyut terhadap tegangan keluaran dengan desain struktur MP

Struktur MP	Torsi Denyut [Nm]	Tegangan Keluaran [V]
0.00	1.14	135
0.25	0.3	144
0.50	0.7	154
0.75	1.3	166
1.00	1.6	178

3.3 Stator Tooth Pairing

Metode ini menggunakan desain dual-stator GMPFR dengan spesifikasi 30 slot dan 20 kutub. Pada satu siklus seperti ditunjukkan gambar 1, nilai torsi denyut yang paling minim pada variasi kombinasi gigi stator 6.5 dan 11.5 deg.(e).



Gambar 1. Karakteristik torsi denyut berdasarkan metode *stator tooth pairing* dan metode *stator displacement* (Sumber gambar (Lee and Jung, 2012))

Kekurangan solusi ini adalah pada desainnya. *Dual-stator* menggunakan kombinasi *inner-rotor* dan *outer rotor*, hal ini akan meningkatkan biaya investasi dua rotor magnet permanen (Pop et al., 2013).

3.4 Stator Displacement

Merujuk pada metode *stator tooth pairing*, pada metode menggunakan lebar a dan b yaitu 9.0 dan 9.0 deg.(e) dengan pertimbangan variable yang sama. Gambar 1 menunjukkan hasil satu siklus torsi denyut. Menurut (Lee and Jung, 2013a), hasil efisien dari penurunan torsi denyut dapat dilihat pada rotasi rotor 30°, yaitu menurun sebesar 86.6% menjadi 0.52 Nm.

Sedangkan, pada penelitian (Lee and Jung, 2012) seperti ditunjukkan tabel, metode *stator displacement* dengan rotasi rotor pada 30° dikombinasikan dengan *pole-arc*. Hasil yang ditunjukkan tegangan terbaik pada rasio pole-arc 0.8889 dan torsi denyut menunjukkan nilai 0.52 Nm seperti pada penelitian (Lee and Jung, 2013a). Kekurangan solusi ini selain pada penggunaan desain *dual-stator*, juga pada manufakturnya yang rumit (Pop et al., 2013).

Tabel 4. Torsi denyut dan tegangan back emf berdasarkan *pole-arc* pada *stator displacement* 30°

Rasio <i>Pole-arc</i>	Torsi Denyut [Nm]	Tegangan Keluaran [V]
0.6111	1.36	82.05
0.6667	1.19	86.86
0.7222	0.58	90.85
0.7777	0.86	94.07
0.8333	0.88	96.63
0.8889	0.52	98.78

4. KESIMPULAN

Menurut paper-paper sebelumnya pada metode *pole arc*, terdapat kendala merancang nilai kebenaran dari lebar *pole-arc* pada magnet permanen dan hanya akan menghasilkan torsi rendah pada mesin dengan jumlah multi slot dan sedikit kutub. Hampir sama dengan *pole-arc*, tetapi justru dengan desain struktur magnet permanen tidak menghasilkan tegangan sebesar *pole-arc*. Sedangkan pada dengan solusi *stator tooth pairing* dan *stator displacement*, inventasi jauh lebih tinggi karena menggunakan desain *dual-stator*. Metode-metode ini mematahkan teori bahwa teknologi pembangkit listrik tenaga angin memiliki keuntungan dari segi manufaktur, karena hasil analisa menunjukkan manufaktur mesin akan menjadi rumit dan biaya akan bertambah mahal. Dari hasil yang telah dipaparkan, metode yang dapat meminimalisir produksi torsi denyut, jika dilihat dari hasil nilai torsi denyut paling kecil adalah desain *outer-rotor* GMPFR dengan variasi desain struktur magnet permanen, yaitu 0.3 Nm.

DAFTAR PUSTAKA

- Bianchi, N., Bolognani, S., 2002. Design techniques for reducing the cogging torque in surface-mounted PM motors. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 38, 1259–1265. doi:10.1109/TIA.2002.802989
- Chen, N., Ho, S.L., Fu, W.N., 2010. Optimization of Permanent Magnet Surface Shapes of Electric Motors for Minimization of Cogging Torque Using FEM. *IEEE Trans. Magn.* 46, 2478–2481. doi:10.1109/TMAG.2010.2044764
- Daohan Wang, Xiuhe Wang, Yubo Yang, Ran Zhang, 2010. Optimization of Magnetic Pole Shifting to Reduce Cogging Torque in Solid-Rotor Permanent-Magnet Synchronous Motors. *IEEE Trans. Magn.* 46, 1228–1234. doi:10.1109/TMAG.2010.2044044
- Deok-je Bang, Polinder, H., Shrestha, G., Ferreira, J.A., 2008. Comparative design of radial and transverse flux PM generators for direct-drive wind turbines. *IEEE*, pp. 1–6. doi:10.1109/ICELMACH.2008.4800027
- Dubois, M.R., Polinder, H., Ferreira, J.A., 2002. Magnet shaping for minimal magnet volume in machines. *IEEE*, p. FT2. doi:10.1109/INTMAG.2002.1001357
- Fei, W., Luk, P., 2010. A New Technique of Cogging Torque Suppression in Direct-Drive Permanent-Magnet Brushless Machines. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 46, 1332–1340. doi:10.1109/TIA.2010.2049551
- Fei, W., Luk, P.C.-K., 2012. Torque Ripple Reduction of a Direct-Drive Permanent-Magnet Synchronous Machine by Material-Efficient Axial Pole Pairing. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 59, 2601–2611. doi:10.1109/TIE.2011.2158048
- Fei, W., Zhu, Z.Q., 2013. Comparison of Cogging Torque Reduction in Permanent Magnet Brushless Machines by Conventional and Herringbone Skewing Techniques. *IEEE Trans. Energy Convers.* 28, 664–674. doi:10.1109/TEC.2013.2270871
- Gyeong-Chan Lee, Seung-Han Kam, Tae-Uk Jung, 2014. Design on permanent magnet structure of radial flux permanent magnet generator for cogging torque reduction and low torque ripple. *IEEE*, pp. 1–9. doi:10.1109/EPE.2014.6911002
- Gyeong-Chan Lee, Su-Min Kang, Tae-Uk Jung, 2013. Permanent magnet structure design of outer rotor radial flux permanent magnet generator for reduction cogging torque with design of experiment. *IEEE*, pp. 315–319. doi:10.1109/ICEMS.2013.6754452
- Hanselman, D.C., 1997. Effect of skew, pole count and slot count on brushless motor radial force, cogging torque and back EMF. *IEE Proc. - Electr. Power Appl.* 144, 325. doi:10.1049/ip-epa:19971205
- Haqqi, M.H., Nugroho, G., Musyafa', A., 2013. Rancang Bangun Turbin Angin Vertikal Jenis Savonius dengan Variasi Jumlah Blade Terintegrasi Circular Shield untuk Memperoleh Daya Maksimum. *Tek. POMITS* 7, 1–6.
- Hwang, C.C., John, S.B., Wu, S.S., 1998. Reduction of cogging torque in spindle motors for CD-ROM drive. *IEEE Trans. Magn.* 34, 468–470. doi:10.1109/20.667794
- Kilk, A., Kudrjavec, O., 2012. Study and verification of a slow speed PM generator with outer rotor for small scale wind turbines. *IEEE*, pp. 1–6. doi:10.1109/PQ.2012.6256198
- Lateb, R., Takorabet, N., Meibody-Tabar, F., 2006. Effect of magnet segmentation on the cogging torque in surface-mounted permanent-magnet motors. *IEEE Trans. Magn.* 42, 442–445. doi:10.1109/TMAG.2005.862756

- Lee, G.-C., Jung, T.-U., 2013a. Cogging torque reduction design of dual stator radial flux permanent magnet generator for small wind turbine. *IEEE*, pp. 85–89. doi:10.1109/TENCONSpring.2013.6584422
- Lee, G.-C., Jung, T.-U., 2013b. Optimal cogging torque reduction design of dual stator radial flux permanent magnet generator. *IEEE*, pp. 1–9. doi:10.1109/EPE.2013.6634427
- Lee, G.-C., Jung, T.-U., 2012. Design study of dual stator Radial Field Permanent Magnet generator for small wind turbine. *IEEE*, pp. 1349–1351. doi:10.1109/VPPC.2012.6422685
- Lukaniszyn, M., Jagiela, M., Wrobel, R., 2004. Optimization of Permanent Magnet Shape for Minimum Cogging Torque Using a Genetic Algorithm. *IEEE Trans. Magn.* 40, 1228–1231. doi:10.1109/TMAG.2004.825185
- Pakpahan, S., n.d. Pemetaan Energi Angin untuk Pemanfaatan dan Melengkapi Peta Potensi SDA Indonesia. Teks Orasi Pengukuhan Ahli Peneliti Utama Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional.
- Pop, A.A., Jurca, F., Oprea, C., Chirca, M., Breban, S., Radulescu, M.M., 2013. Axial-flux vs. radial-flux permanent-magnet synchronous generators for micro-wind turbine application. *IEEE*, pp. 1–10. doi:10.1109/EPE.2013.6634639
- Sang-Moon Hwang, Jae-Boo Eom, Yoong-Ho Jung, Deug-Woo Lee, Beom-Soo Kang, 2001. Various design techniques to reduce cogging torque by controlling energy variation in permanent magnet motors. *IEEE Trans. Magn.* 37, 2806–2809. doi:10.1109/20.951313
- Sivachandran, P., Venkatesh, P., Kamaraj, N., 2008. Cogging torque reduction in Dual-Rotor Permanent Magnet Generator for Direct Coupled Stand-Alone Wind Energy Systems. *IEEE*, pp. 24–28. doi:10.1109/ICSET.2008.4746966
- Tudorache, T., Trifu, I., 2012. Permanent-Magnet Synchronous Machine Cogging Torque Reduction Using a Hybrid Model. *IEEE Trans. Magn.* 48, 2627–2632. doi:10.1109/TMAG.2012.2198485
- Wang, D., Wang, X., Jung, S.-Y., 2012a. Reduction on Cogging Torque in Flux-Switching Permanent Magnet Machine by Teeth Notching Schemes. *IEEE Trans. Magn.* 48, 4228–4231. doi:10.1109/TMAG.2012.2200237
- Wang, D., Wang, X., Kim, M.-K., Jung, S.-Y., 2012b. Integrated Optimization of Two Design Techniques for Cogging Torque Reduction Combined With Analytical Method by a Simple Gradient Descent Method. *IEEE Trans. Magn.* 48, 2265–2276. doi:10.1109/TMAG.2012.2191416
- Xu, P., Liu, X., Shi, K., Xiao, F., 2014. Design and analysis of a dual-rotor radial flux permanent-magnet generator. *IEEE*, pp. 669–672. doi:10.1109/ICEMS.2014.7013552
- Zhu, Z.Q., Howe, D., 2000. Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines. *IEEE Trans. Energy Convers.* 15, 407–412. doi:10.1109/60.900501
- Zhu, Z.Q., Ruangsinchaiwanich, S., Ishak, D., Howe, D., 2005. Analysis of cogging torque in brushless Machines having nonuniformly distributed stator slots and stepped rotor magnets. *IEEE Trans. Magn.* 41, 3910–3912. doi:10.1109/TMAG.2005.854968