

Kontribusi Terhadap Kuliah Perancangan Mesin Listrik Dalam Pendidikan Teknik Tenaga Listrik Di Indonesia

Rini Nur Hasanah, Soeprapto

Abstrak — Dalam dunia industri, mesin tak serempak banyak digunakan sebagai penggerak utama. Selain itu, sebagai generator mesin ini memungkinkan pembangkitan energi listrik secara otonom di daerah-daerah terpencil. Mengingat pentingnya peran mesin ini, makalah ini dibuat untuk sedikit memberikan kontribusi dalam kuliah perancangan mesin listrik bagi mahasiswa teknik tenaga listrik pada khususnya. Kontribusi yang diberikan berupa tambahan pemahaman terhadap penerapan teori elektromagnetik dalam perhitungan induktansi bocor cincin ujung rotor sangkar saat perancangan mesin tak serempak. Akan ditunjukkan bagaimana beberapa anggapan penyederhanaan diambil agar memungkinkan proses perhitungan dengan menggunakan teori dasar elektromagnetika. Perhitungan analitik berdasarkan metoda bayangan, yang pada umumnya sudah dipelajari dalam kuliah dasar teori elektromagnetik, dibandingkan dengan perhitungan secara analitik-empirik serta dengan perhitungan menggunakan metoda numerik berdasarkan metode elemen terbatas. Dengan memanfaatkan metoda bayangan, induktansi diperoleh melalui penghitungan fluksi yang tercakup total menggunakan vektor potensial. Sebagai pembanding, induktansi juga telah diperoleh dengan menghitung impedansi cincin. Selanjutnya, perhitungan induktansi menggunakan perangkat lunak berdasarkan metoda elemen terbatas juga telah dilakukan melalui penghitungan energi maupun fluksi. Hasil perhitungan analitik menunjukkan adanya kesesuaian dengan hasil numerik, dengan keuntungan metode bayangan lebih sederhana dan mudah untuk diterapkan dibandingkan dengan metode elemen terbatas yang hingga kini seringkali masih terbentur pada lama proses penghitungan serta keterbatasan daya hitung komputer.

Kata-kata Kunci — Vektor potensial, Metode bayangan, Fungsi eliptik.

I. PENDAHULUAN

Untuk dapat menghadapi proses globalisasi industri pada umumnya, industri mesin listrik pada khususnya, pentingnya peran kuliah mesin listrik

bagi mahasiswa teknik tenaga listrik tidak dapat disangkal lagi. Hal ini lebih didukung oleh kenyataan bahwa hingga saat ini Indonesia masih lebih banyak berperan sebagai pengguna dan bukannya penghasil mesin-mesin listrik. Dalam situasi seperti ini, pengetahuan mengenai mesin baik dari segi pemeliharaan maupun perbaikan sangat diperlukan. Alasan lain adalah perlunya merebut kesempatan yang semakin terbuka dengan adanya kecenderungan berbagai perusahaan multinasional untuk memindahkan proses produksinya ke negara-negara berkembang. Selain itu, diharapkan hal ini akan mendukung proses pembangunan industri di Indonesia serta mengurangi ketergantungan baik secara teknis maupun teknologis terhadap negara-negara industri.

Untuk dapat memperkuat kesiapan Indonesia dalam pemenuhan sendiri kebutuhannya akan mesin listrik, baik dalam rangka penyediaan energi listrik maupun pengembangan industri dalam negeri, kuliah perancangan mesin listrik menjadi lebih penting.

Mesin tak serempak, karena kesederhanaan konstruksi serta ketahanannya, menempati posisi yang penting dalam kehidupan sehari-hari. Sebagai motor, mesin ini banyak dijumpai dalam berbagai peralatan rumah tangga serta menunjang peningkatan kenyamanan hidup sehari-hari, disamping sangat penting dalam pembangunan industri nasional.

Dalam bentuk generator, mesin ini berperan dalam penyediaan energi listrik secara otonom, khususnya di daerah-daerah terpencil yang masih banyak ditemui di berbagai pulau nusantara. Peran ini menjadi lebih penting mengingat kondisi geografis Indonesia yang berbentuk kepulauan dengan lebih dari 14 juta pulau. Kondisi ini seringkali menimbulkan kesulitan dalam usaha memasok kebutuhan penduduk akan energi listrik. Prioritas untuk membangun instalasi-instalasi pembangkit baru di wilayah dengan kepadatan penduduk yang tinggi hanya akan makin memperburuk ketakseimbangan demografik yang telah ada, yang diakibatkan oleh adanya kecenderungan urbanisasi menuju daerah-daerah dengan tingkat kenyamanan hidup yang lebih tinggi, fasilitas pendidikan yang lebih baik, kesempatan kerja yang lebih banyak, dan sebagainya. Kondisi-kondisi semacam ini bahkan akan makin memperburuk

Naskah diterima pada tanggal 2 Mei 2007.

Rini Nur Hasanah dan Suprpto bekerja di Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya. Alamat email penulis rini.hasanah@brawijaya.ac.id dan suprpto@indo.net.id.

ketakseimbangan hampir di semua bidang kehidupan.

Dalam era baru reformasi di Indonesia, otonomi lebih yang dimiliki oleh pemerintah daerah akan memungkinkan peningkatan kesejahteraan rakyat secara lebih merata. Pemerintah daerah akan lebih dituntut untuk dapat menciptakan lebih banyak kesempatan kerja, misalnya dengan menciptakan industri-industri lokal serta menarik investor-investor dari luar daerah. Pemerintah daerah juga dituntut untuk membangun lebih banyak infrastruktur untuk meningkatkan tingkat kehidupan penduduk serta untuk mencegah larinya sumber daya dan tenaga manusia ke luar daerah. Dalam semua usaha tersebut, penyediaan dan pembangkitan energi listrik secara otonom sangat diperlukan, terlebih-lebih di berbagai daerah yang masih terisolasi dari jaringan listrik yang sudah ada. Daerah-daerah semacam ini dapat dengan mudah dijumpai di berbagai bagian dari kepulauan Indonesia. Sumber-sumber energi terbarukan seperti angin, tenaga matahari, aliran sungai atau bahkan mungkin tenaga pasang surut bisa dimanfaatkan untuk menjamin pemasokan energi listrik di daerah.

Mengingat semua hal tersebut, dalam makalah ini diberikan kontribusi terhadap pendidikan teknik tenaga listrik di Indonesia. Bagi mahasiswa teknik tenaga listrik khususnya, kontribusi ini berupa tambahan pemahaman terhadap penerapan teori elektromagnetik dalam perkuliahan mesin listrik, yaitu perhitungan induktansi bocor dari cincin ujung mesin tak serempak berotor sangkar. Perhitungan analitik berdasarkan metoda bayangan akan diuraikan, kemudian hasilnya akan dibandingkan dengan hasil perhitungan analitik-empirik serta secara numerik menggunakan perangkat lunak berdasar metoda elemen terbatas.

II. DASAR TEORI DAN METODA PERHITUNGAN

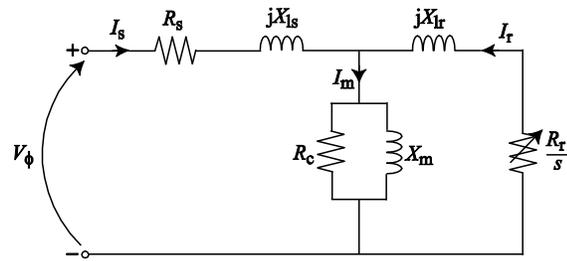
A. Induktansi bocor dalam proses perancangan mesin listrik

Tujuan umum perancangan mesin tak serempak adalah untuk memprediksi karakteristik operasi serta kinerjanya sebelum tahap akhir konstruksi. Untuk itu, mesin digantikan dengan suatu rangkaian pengganti yang tersusun dari berbagai parameter, sebagaimana ditunjukkan pada Gb. 1.

R_s , R_r , dan R_c berturut-turut adalah resistansi dari stator, rotor serta rugi inti. X_s dan X_r merupakan reaktansi bocor dari stator serta rotor, sementara X_m adalah reaktansi pemagnetan, sedangkan s merupakan slip kerja mesin tak serempak. Dengan demikian boleh dikata bahwa keakuratan prediksi tergantung pada keakuratan penentuan parameter-parameter mesin.

Induktansi bocor, yaitu reaktansi bocor tanpa memperhitungkan pengaruh frekuensi kerja, menggambarkan lintasan-lintasan yang dilalui oleh fluksi-fluksi magnetik yang tidak berperan secara langsung dalam proses konversi energi

elektromagnetik. Tergantung dari tempat terjadinya, dibedakan berbagai macam fluksi bocor.

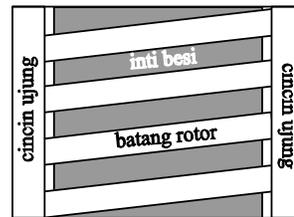


Gb. 1 Rangkaian pengganti satu fasa motor tak serempak 3-fasa

B. Induktansi cincin ujung

Fluksi bocor cincin ujung yang dibahas dalam makalah ini didefinisikan sebagai fluksi bocor yang dihasilkan oleh arus yang mengalir dalam bagian cincin ujung rotor sangkar.

Rotor sangkar motor tak serempak diperlihatkan pada Gb. 2. Rotor pada gambar tersebut mencakup juga batang-batang rotor, cincin-cincin ujung serta inti besi rotor.



Gb. 2 Rotor sangkar dari motor tak serempak

Untuk menghitung induktansi bocor cincin ujung, pendekatan biasanya dilakukan dengan cara memasukkannya dalam perhitungan induktansi bocor kumparan ujung stator atau dengan menggunakan suatu persamaan tersendiri. Kedua cara tersebut memerlukan adanya koreksi secara empirik [1-4]. Meskipun begitu, terdapat sangat banyak variasi persamaan dalam berbagai literatur. Hal ini menggambarkan kesulitan serta ketidakpastian dalam penentuan jenis induktansi bocor ini.

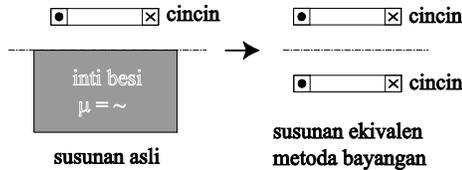
Dalam makalah ini, induktansi bocor cincin ujung dihitung dengan menggunakan metoda bayangan yang biasanya sudah dikenal dari kuliah teori umum elektromagnetik. Rapat arus dalam cincin diasumsikan homogen. Selain itu, inti besi dianggap mempunyai permeabilitas yang tak terhingga. Dianggap juga bahwa mayoritas dari fluksi yang dihasilkan oleh arus dalam cincin menempuh lintasan-lintasan yang terdapat di udara, sehingga induktansi bocornya bisa diperkirakan dari induktansi total cincin ujung. Cincin ujung digantikan dengan sejumlah cincin elementer yang berada di dekat inti besi yang mempunyai permeabilitas tak terhingga.

Dalam makalah ini akan diuraikan metoda perhitungan induktansi dengan melalui penghitungan fluksi yang tercakup total menggunakan vektor potensial (metoda a). Sebagai pembandingan akan

digunakan hasil dari penggunaan metoda analitik-empirik melalui penghitungan impedansi cincin ([2], metoda b). Selain itu, dilakukan juga perhitungan dengan menggunakan metoda elemen terbatas melalui penghitungan energi yang tersimpan atau fluksi (metoda c).

C. Metoda bayangan

Dengan menggunakan metoda bayangan, susunan yang terdiri dari cincin yang terletak di dekat inti besi dengan permeabilitas tak terhingga digantikan dengan susunan dua buah cincin berarus sama di udara, sebagaimana ditunjukkan pada Gb. 3.



Gb. 3 Metoda bayangan untuk susunan rotor dan cincin ujung

D. Perhitungan induktansi cincin ujung

Untuk memahami interaksi antara cincin asli dengan bayangannya, pada Gb. 4 ditunjukkan dua buah cincin yang terbuat dari filamen penghantar yang dialiri arus serta berada di udara. Vektor potensial sepanjang cincin kedua C2 yang dihasilkan oleh arus yang mengalir dalam cincin pertama C1, dan sebaliknya, diperlihatkan dengan lebih terperinci pada Gb. 5. Vektor potensial magnetik \vec{A} di titik P yang dihasilkan oleh arus I yang mengalir sepanjang kontur C bisa diperoleh dari [6-8]:

$$\vec{A} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint_C \frac{d\vec{l}}{R} \tag{1}$$

dengan $d\vec{l} = a d\phi$

$$\text{dan } R = \sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \cos \phi + z^2}$$

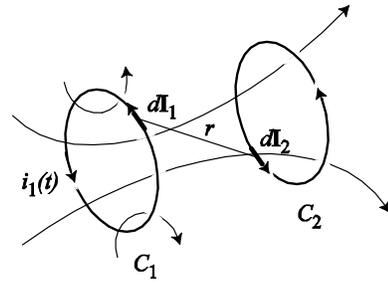
dengan menggunakan $\phi = \pi - 2\psi$, serta $d\phi = -2d\psi$

$$\text{dan } \cos \phi = 2\sin^2 \psi - 1.$$

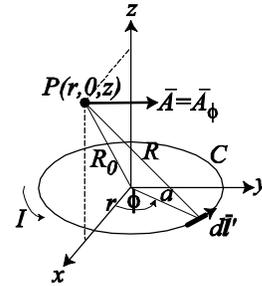
Vektor potensial yang dihasilkan hanya akan mempunyai komponen berarah tangensial,

$$A = A_\phi = \frac{\mu_0 I}{4\pi} 2 \int_0^\pi \frac{a \cos \phi d\phi}{\sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \cos \phi + z^2}} \tag{2}$$

$$= \frac{\mu_0 I a}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{2\sin^2 \psi - 1}{\sqrt{(r+a)^2 + z^2 - 4ar \sin^2 \psi}} d\psi \tag{3}$$



Gb. 4 Interaksi dua buah filamen arus berbentuk cincin



Gb. 5 Perhitungan vektor potensial

Pada akhirnya vektor potensial magnetik bisa dinyatakan sebagai:

$$A_\phi = \frac{\mu_0 I}{\pi k} \sqrt{\frac{a}{r}} \left[\left(1 - \frac{k^2}{2}\right) K - E \right] \tag{4}$$

dengan $k = 2 \sqrt{\frac{ar}{(r+a)^2 + z^2}}$ (5)

$$K = \int_0^{\pi/2} \frac{d\phi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \phi}} \tag{6}$$

dan $E = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \phi} d\phi$ (7)

K dan E disebut integral eliptik komplit jenis pertama dan kedua, sedangkan k adalah modulusnya. K dan E dapat didekati secara numerik dengan menggunakan deret sebagai berikut:

$$K = \frac{\pi}{2} \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 k^2 + \left(\frac{1 \times 3}{2 \times 4}\right)^2 k^4 + \dots \right\} \tag{8}$$

dan $E = \frac{\pi}{2} \left\{ 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^2 \frac{k^2}{1} - \left(\frac{1 \times 3}{2 \times 4}\right)^2 \frac{k^4}{3} - \dots \right\}$ (9)

atau bisa juga dihitung dengan memanfaatkan fungsi-fungsi siap pakai dalam berbagai perangkat lunak hitung yang banyak dikenal (Matlab, MathCad, dan sebagainya).

Selanjutnya fluksi total yang ditimbulkan oleh arus yang mengalir dalam cincin filamen pertama C1 yang

mencakup cincin filamen kedua C2 diperoleh dengan:

$$\Psi = A_{\phi} (2\pi r) \quad (10)$$

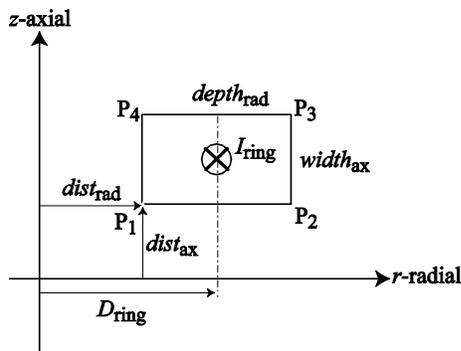
dengan r adalah jari-jari cincin C_2 . Fluksi total yang akan digunakan untuk menghitung induktansi cincin ujung bisa diperoleh dari kontribusi arus-arus dalam semua cincin filamen pembentuk cincin-cincin asli dan bayangannya. Pada akhirnya induktansi cincin ujung L_e dapat diperoleh dari perbandingan antara fluksi tercakup total Ψ terhadap arus I yang mengalir dalam cincin.

$$L_e = \frac{\Psi}{I} \quad (11)$$

III. HASIL DAN ANALISA

A. Metoda bayangan

Dimensi cincin yang digunakan dalam perhitungan ditunjukkan pada Gb. 6, sedangkan nilai-nilai numeriknya diberikan pada Tabel 3.1.



Gb. 6 Parameter-parameter cincin

TABEL 3.1 NILAI PARAMETER-PARAMETER CINCIN YANG DIGUNAKAN DALAM PERHITUNGAN

Diameter rata-rata cincin	$D_{ring} = 57.126E-3$ [m]
Tebal cincin dalam arah radial	$depth_{rad} = 12.274E-3$ [m]
Tebal cincin dalam arah aksial	$width_{ax} = 8.077E-3$ [m]

Parameter $dist_{rad}$ dan $dist_{ax}$ merupakan jarak antara cincin dengan poros motor serta dengan inti rotor berturut-turut. P1, P2, P3 dan P4 merupakan posisi titik-titik sudut yang membentuk penampang lintang cincin.

B. Hasil perhitungan induktansi

Hasil perhitungan induktansi bocor cincin ujung ditampilkan pada Tabel 3.2. Ditunjukkan juga hasil perhitungan dengan menggunakan metoda analitik-empirik [5] serta metoda numerik berdasarkan metoda elemen terbatas [9].

TABEL 3.2 HASIL PERHITUNGAN INDUKTANSI CINCIN UJUNG DENGAN MENGGUNAKAN METODA BAYANGAN [HENRY]

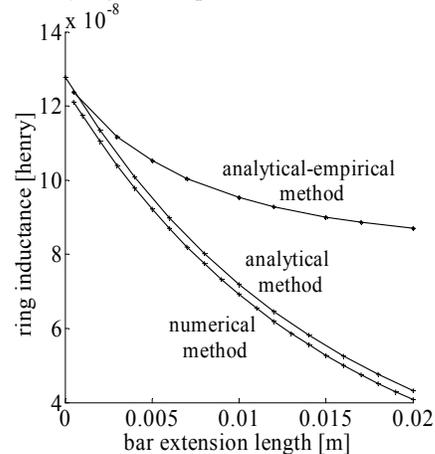
Metoda a)	1.2405E-7
Metoda b)	1.2373E-7

Metoda c) 1.2104E-7

Penggunaan vektor potensial untuk menghitung fluksi total yang tercakup oleh cincin memberikan hasil yang sesuai dengan hasil penghitungan melalui penghitungan impedansi cincin maupun penghitungan langsung menggunakan metoda elemen terbatas. Metoda yang telah diuraikan memberikan keuntungan lebih mudah diterapkan dibandingkan dengan kedua metoda lainnya yang digunakan sebagai pembanding. Metoda yang memanfaatkan penghitungan impedansi cincin memerlukan tambahan persamaan empirik dalam penghitungan induktansi sendiri cincin, sedangkan metoda elemen terbatas seringkali terbentur oleh lama waktu proses penghitungan serta keterbatasan teknis.

C. Pengaruh perpanjangan batang rotor

Pengaruh perpanjangan batang-rotor $dist_{ax}$ diperlihatkan pada Gb. 7. Sebagaimana diharapkan, makin jauh posisi cincin dari inti besi, makin berkurang induktansinya karena makin berkurang juga fluksi yang tercakup.



Gb. 7 Influence of rotor-bar extension length on the ring inductance

IV. KESIMPULAN

Dalam makalah ini ditunjukkan penggunaan metoda bayangan, yang kebanyakan sudah dikenal dari kuliah teori elektromagnetik, untuk menghitung induktansi bocor cincin ujung rotor sangkar. Ditunjukkan juga bahwa metoda yang diusulkan memberikan hasil yang memuaskan dengan tambahan keuntungan lebih mudah untuk diterapkan dibandingkan dengan metoda-metoda pembanding.

Makalah ini diharapkan bisa sedikit memberikan kontribusi, khususnya kepada para mahasiswa untuk memahami salah satu penerapan penting teori elektromagnetik dalam dunia mesin listrik. Diharapkan juga makalah ini bisa lebih menarik minat mahasiswa terhadap bidang teknik tenaga listrik, disamping diharapkan juga makin timbul kesadaran akan pentingnya kuliah perancangan mesin listrik dalam pendidikan teknik tenaga listrik di

Indonesia.