

Transduser Arus Bolak-Balik Menggunakan Kumputan Rogowski

Budhi Anto¹, Andri Saputra¹

Jurusan Teknik Elektro – Universitas Riau

Jl. HR. Subrantas km 12,5 Simpang Baru, Pekanbaru, telp/fax (0761) 66596/(0761) 66595

e-mail: budhianto.ur@gmail.com

Abstrak

Paparan ini menampilkan perancangan dan pembuatan kumparan rogowski berikut rangkaian pengkondisi sinyalnya untuk digunakan sebagai alat ukur arus bolak-balik. Tegangan induksi pada ujung-ujung kumparan rogowski dihubungkan ke rangkaian integrator aktif untuk mendapatkan sinyal tegangan yang berbanding lurus dengan arus yang diukur. Kemudian keluaran rangkaian integrator diperkuat tingkatannya dan disearahkan menggunakan rangkaian penyearah presisi berbasis penguat operasional. Tegangan keluaran penyearah dibuat rata terlebih dahulu dengan pemasangan kapasitor perata sebelum dihubungkan kepada port masukan analog mikrokontroler ATMEGA 8535. Pembacaan ATMEGA 8535 ditampilkan pada layar LCD. Pengujian dengan menggunakan pembanding alat ukur arus bolak-balik berbasis besi putar kelas 0,5 memperlihatkan bahwa untuk rentang pengukuran arus 0 sampai 5 A, persentase kesalahan pengukuran maksimum adalah 2,5%.

Kata kunci: kumparan rogowski, integrator aktif, penyearah presisi, mikrokontroler ATMEGA8535

Abstract

This paper presents an attempt to design and make a rogowski coil together with its signal conditioning circuit for alternating current measurement. The induced voltage between rogowski coil ends is connected to active integrator circuit to yield voltage signal that is linear corresponding with the measured current. The output of integrator circuit is amplified its level before rectified using precision rectifier circuit. The output of precision rectifier is filtered using capacitor before connected to analog input port of ATMEGA8535 microcontroller. Microcontroller performs data acquisition of the signal, processes it and sends information of the rms value of the measured current to an LCD display. A test with 0.5 class moving-iron type amperemeter as a comparison shows that for measurement of alternating current from 0 to 5 amperes, the maximum value of error measurement is 2.5%.

Keywords: rogowski coil, active integrator, precision rectifier, ATMEGA8535 microcontroller

1. Pendahuluan

Untuk mengukur arus bolak-balik yang besar biasanya digunakan sensor trafo arus atau CT (*current transformer*). Konstruksi CT terdiri atas inti yang berbentuk toroid dan belitan yang dililitkan pada inti tersebut. Prinsip kerja CT adalah seperti prinsip kerja transformator pada umumnya. Sisi primer CT adalah penghantar yang akan diukur arusnya, yang diletakkan di tengah-tengah toroid, sedangkan sisi sekunder CT adalah belitan pada inti toroid tersebut. Untuk mengukur arus bolak-balik, sisi sekunder CT dihubungkan dengan alat ukur amperemeter.

CT konvensional menggunakan inti dari bahan feromagnetik. Bahan feromagnetik memiliki keunggulan pada nilai permeabilitasnya yang besar sehingga fluks magnet yang dihasilkan oleh arus yang mengalir pada penghantar dapat dikumpulkan dalam jumlah yang sangat banyak di dalam bahan feromagnetik, sehingga arus induksi yang diperoleh dari sisi sekunder CT dapat digunakan untuk menggerakkan beban dengan resistansi rendah seperti jarum penunjuk amperemeter atau rele proteksi elektromekanik [1]. Namun bahan feromag-netik memiliki karakteristik bahwa rapat fluksnya akan jenuh jika arus magnetisasinya terlalu besar. Bersama dengan fenomena kejenuhan inti, efek histeresis dan fluks magnet sisa, menyebabkan bentuk arus sisi sekundernya mengalami distorsi sehingga pembacaan alat ukur amperemeter menjadi kurang teliti, begitu pula dengan penurunan kinerja rele proteksi sebagaimana dijelaskan pada [2] dengan mengacu ke [3].

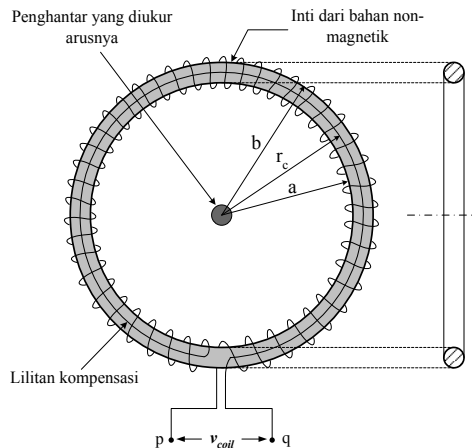
Kumparan rogowski, seperti namanya, ditemukan oleh Walter Rogowski pada tahun 1912 [4]. Konstruksi kumparan rogowski adalah seperti CT tetapi menggunakan inti udara. Meskipun sama-sama menggunakan inti udara, kumparan rogowski berbeda dengan *linear coupler* baik dari segi konstruksi maupun prinsip kerjanya. Ujung-ujung kumparan rogowski ditutup dengan beban impedansi tinggi sedangkan ujung-ujung *linear coupler* ditutup dengan beban impedansi rendah [1,5]. Meskipun telah lama dikenal namun kumparan rogowski baru mulai dikembangkan akhir-akhir ini seiring dengan kemajuan teknologi piranti elektronika pengkondisi sinyal. Bersama dengan MOCT (*magneto-optic current transducer*) kumparan rogowski telah dimasukkan dalam kelompok transduser arus listrik generasi baru [6].

Berbeda dengan bahan feromagnetik, karakteristik magnetisasi udara adalah linier dan tidak mengalami efek jenuh sehingga arus sisi primer dari sensor kumparan rogowski akan dipetakan secara sempurna pada sisi sekundernya. Karena karakteristik liniernya, kumparan rogowski telah digunakan untuk mengukur arus-arus peralihan seperti arus-arus pada percobaan hubung singkat, percobaan petir dan percobaan *partial discharge* [4]. Disamping itu, kumparan rogowski telah digunakan untuk menggantikan CT konvensional pada rangkaian sensor rele proteksi digital [1] dan pengukuran arus berfrekuensi tinggi [7,8].

Selain keunggulan karakteristik magnetisasinya yang linier dan tidak jenuh, kumparan rogowski mempunyai keunggulan-keunggulan lain atas CT yaitu konstruksinya sederhana dan tidak mahal serta bersifat non-intrusif – dalam arti pada kondisi-kondisi tertentu pemasangan kumparan rogowski tidak membebani penghantar yang akan diukur arusnya [7]. Karena keunggulan-keunggulan tersebut maka kami tertarik untuk membuat kumparan rogowski dalam rangka penguasaan teknologi transduser ini. Transduser yang dibuat digunakan untuk mengukur arus bolak-balik dengan frekuensi nominal 50 hertz.

2. Prinsip Kerja Kumparan Rogowski

Konstruksi kumparan rogowski diperlihatkan pada Gambar 1. Konstruksi tersebut dinamakan kumparan rogowski dengan satu-lapis belitan (*single layer winding rogowski coil*) [1,7,9]. Belitan tersebut dililitkan di sepanjang inti toroid. Medan magnet di sekitar penghantar dapat menginduksikan tegangan pada belitan tersebut sehingga akan mempengaruhi ketelitian pengukuran arus yang mengalir pada penghantar. Tegangan induksi tersebut dikompensasi oleh lilitan tunggal yang berada di tengah-tengah belitan [1,9].



Gambar 1: Konstruksi kumparan rogowski

Kumparan rogowski merupakan aplikasi dari Hukum Ampere dan Hukum Faraday. Hukum Ampere menyatakan bahwa integral garis dari medan magnet H di sepanjang lintasan tertutup adalah sama dengan total arus yang dilingkupi oleh lintasan tertutup tersebut. Secara matematika Hukum Ampere dapat ditulis sebagai berikut,

$$i = \oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_0^l H \cos \alpha dl \quad (1)$$

dimana H adalah medan magnet, $d\vec{l}$ adalah elemen kecil dari lintasan magnetik l dimana nilai H dievaluasi dan i adalah arus yang dilingkupi oleh lintasan tertutup. Hukum Faraday-Lenz menyatakan bahwa tegangan induksi akan dibangkitkan apabila terdapat perubahan fluks magnet (Hukum Faraday) dan apabila tegangan induksi tersebut muncul pada sebuah sirkuit tertutup, maka terdapat arus induksi yang arah alirnya adalah sedemikian sehingga fluks magnet yang dihasilkannya selalu melawan perubahan fluks magnet penghasilnya (Hukum Lenz).

Jika arus listrik mengalir pada penghantar yang terdapat di tengah-tengah toroid, maka tegangan induksi (v_{coil}) akan muncul pada ujung-ujung kumparan rogowski (pada terminal p dan terminal q). Tegangan induksi tersebut merupakan integrasi dari tegangan induksi pada setiap lilitan dari kumparan rogowski. Dengan mengambil tebal 1 lilitan sebagai $d\vec{l}$ (yaitu elemen panjang dari lintasan magnetik inti kumparan rogowski) maka tegangan induksi pada setiap lilitan adalah sebagai berikut,

$$v_{dl} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \left(\iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \right) = -\frac{d}{dt} \left(\iint_S \mu_o \vec{H} \cdot d\vec{S} \right) = -\mu_o A \frac{dH}{dt} \cos \alpha \quad (2)$$

dimana μ_o adalah permeabilitas ruang hampa, A adalah luas penampang lilitan. Tegangan induksi total adalah sebagai berikut,

$$v_{coil} = \int_0^l v_{dl} n dl = -\mu_o An \int_0^l \frac{dH}{dt} \cos \alpha dl = -\mu_o An \frac{d}{dt} \int_0^l H \cos \alpha dl = -\mu_o An \frac{di}{dt} \quad (3)$$

dimana n adalah jumlah lilitan per satuan panjang. Dari persamaan (3) terlihat bahwa tegangan induksi pada ujung-ujung kumparan rogowski berbanding lurus dengan diferensial arus yang diukur. Konstanta pembandingnya dinamakan induktansi bersama kumparan M , sehingga diperoleh,

$$v_{coil} = -M \frac{di}{dt} \quad (4)$$

sehingga diperoleh,

$$M = \mu_o An = \mu_o A \frac{N}{l} \quad (5)$$

dimana N adalah jumlah lilitan kumparan rogowski.

Persamaan (4) memperlihatkan bahwa untuk mendapatkan sinyal arus yang diukur, maka sinyal keluaran kumparan rogowski harus dilewatkan pada rangkaian integrator.

Jika arus i adalah berbentuk gelombang sinus dengan frekuensi ω , maka persamaan (4) dapat ditulis sebagai berikut,

$$v_{coil} = -M \frac{d}{dt} (\sqrt{2} I \sin \omega t) = -\sqrt{2} I \omega M \cos \omega t \quad (6)$$

sehingga nilai maksimum v_{coil} adalah,

$$v_{coil-maks} = \sqrt{2} I \omega M \quad (7)$$

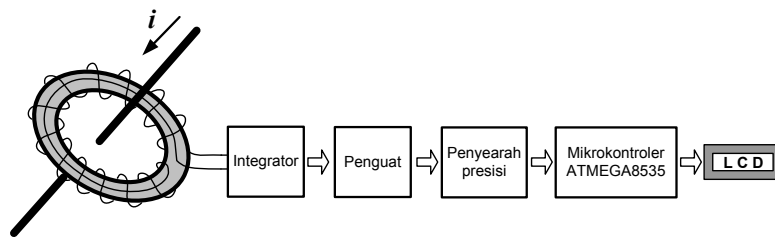
sehingga diperoleh nilai M yaitu,

$$M = \frac{v_{coil-maks}}{\sqrt{2} I \omega} \quad (8)$$

3. Metode Penelitian

Dalam penelitian ini telah dilakukan perancangan, pembuatan dan pengujian transduser arus bolak-balik yang menggunakan kumparan rogowski sebagai sensor arusnya. Kumparan rogowski yang dibuat adalah dari jenis belitan satu-lapis. Rancangan transduser secara diagram blok diperlihatkan pada Gambar 2. Rangkaian pengkondisi sinyal terdiri atas rangkaian penguat integrator dan rangkaian penyearah presisi yang dilengkapi dengan kapasitor perata. Keluaran penyearah presisi dihubungkan ke masukan analog dari mikrokontroler ATMEGA8535. Mikrokontroler menampilkan hasil akuisisi data pada layar LCD.

Sistem pengukuran dirancang untuk mengukur arus bolak-balik sampai 5 ampere. Nilai ini ditetapkan karena pertimbangan keterbatasan peralatan yang tersedia di laboratorium pengujian. Oleh karena itu rancangan kumparan rogowski dan besar penguatan rangkaian integrator disesuaikan untuk tujuan diatas.



Gambar 2: Diagram blok sistem pengukuran

Tabel 1: Parameter inti kumparan rogowski

Parameter	Nilai (cm)
b	5,5
a	2,4
r_c	3,95

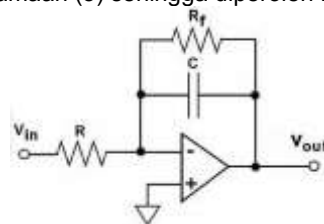
Inti kumparan rogowski menggunakan bahan plastik berongga. Bahan ini adalah bera-sal dari mainan anak-anak. Parameter inti kumparan diperlihatkan pada Tabel 1. Dari Tabel 1, panjang lintasan magnetik bahan inti dapat ditentukan yaitu,

$$l = 2\pi r_c = 24,82 \text{ cm} = 0,2482 \text{ m}$$

Selanjutnya luas penampang inti kumparan adalah sebagai berikut,

$$A = \frac{1}{4} \pi (b - a)^2 = 7,55 \text{ cm}^2 = 0,000755 \text{ m}^2$$

Nilai $v_{coil-max}$ pada arus sebesar 5 ampere dengan frekuensi 50 Hz adalah diharapkan sebesar 50 mV, sehingga dari persamaan (8) diperoleh nilai M sebesar 22,5 μH . Jumlah lilitan kumparan rogowski N dapat dihitung dengan menyelesaikan persamaan (5) sehingga diperoleh $N = 5886$ lilitan.



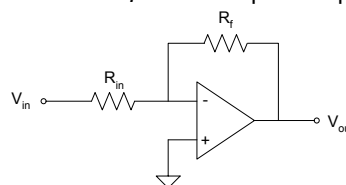
Gambar 3. Rangkaian inverting integrator [10]

Rangkaian integrator adalah dari jenis integrator aktif berbasis penguat operasional. Rangkaian integrator diperlihatkan pada Gambar 3. Dengan mengambil nilai $R_f \gg R$, maka sinyal keluaran integrator adalah sebagai berikut,

$$v_{out} = -\frac{1}{RC} \int v_{in} dt \tag{9}$$

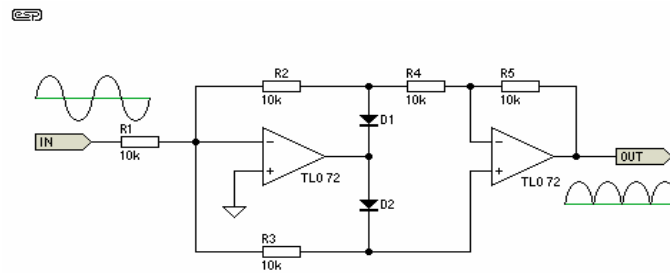
Disini diambil nilai $R = 10 \text{ k}\Omega$, $R_f = 330 \text{ k}\Omega$ dan $C = 10 \text{ nF}$.

Penguat tegangan menggunakan rangkaian penguat pembalik seperti diperlihatkan pada Gambar 4. Dengan mengambil $R_{in} = 2 \text{ k}\Omega$ dan $R_f = 10 \text{ k}\Omega$ diperoleh penguatan tegangan sebesar -5.



Gambar 4. Rangkaian penguat pembalik

Rangkaian penyearah presisi berfungsi menyearahkan sinyal keluaran rangkaian penguat tegangan untuk selanjutnya dibaca oleh mikrokontroler. Rangkaian penyearah presisi yang digunakan diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Rangkaian penyearah presisi [11]

Mikrokontroler berfungsi mengakuisisi sinyal keluaran rangkaian penyearah presisi, mengolahnya dan menampilkan hasilnya pada layar LCD. Mikrokontroler yang digunakan adalah ATMEGA 8535.

4. Hasil dan Pembahasan

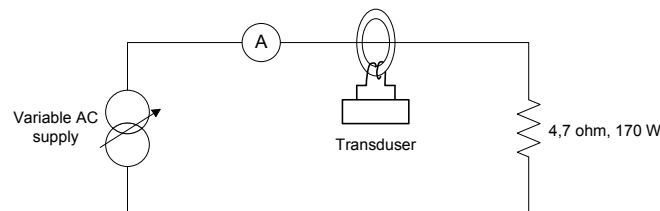
Kumparan rogowski yang telah dibuat beserta rangkaian transdusernya diperlihatkan pada Gambar 6 dan Gambar 7. Selanjutnya dilakukan pengujian untuk mengukur kinerja transduser. Peralatan yang digunakan adalah sumber tegangan bolak-balik yang dapat diatur, beban resistif dan amperemeter besi putar kelas 0,5. Rangkaian pengujian diperlihatkan pada Gambar 8. Prosedur pengujian adalah tegangan sumber dinaikkan secara bertahap sehingga terdapat kenaikan arus secara bertahap pula. Untuk setiap tahap kenaikan arus dilakukan pencatatan terhadap pembacaan amperemeter dan pembacaan transduser. Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 2.



Gambar 6. Kumparan rogowski yang dibuat



Gambar 7. Rangkaian transduser yang terakit dalam kotak



Gambar 8. Rangkaian pengujian

Tabel 2. Hasil pengujian transduser dengan pembanding amperemeter besi putar kelas 0,5

Pembacaan amperemeter (A)	Pembacaan transduser (A)	Persentase kesalahan (%)
0	0	0
0,5	0,5	0
1,0	1,0	0
1,5	1,5	0
2,0	2,0	0
2,5	2,5	0
3,0	3,0	0
3,5	3,5	0
4,0	4,1	2,5
4,5	4,5	0
5,0	5,0	0

Persentase kesalahan pengukuran dihitung dengan menggunakan persamaan berikut,

$$\text{kesalahan pengukuran} = \frac{| \text{pembacaan}_{\text{ amperemeter}} - \text{pembacaan}_{\text{ transduser}} |}{\text{pembacaan}_{\text{ amperemeter}}} \times 100\%$$

Hasil pengujian sebagaimana ditampilkan pada Tabel 2 memperlihatkan bahwa untuk rentang pengukuran arus resistif 0 sampai 5 ampere, persentase kesalahan pengukuran maksimum adalah 2,5 %

5. Kesimpulan

Kumparan rogowski jenis belitan satu-lapis telah dirancang dan dibuat bersama dengan rangkaian pengkondisi sinyalnya dan rangkaian pengolah data. Hasil pengujian pengukuran arus resistif dengan menggunakan amperemeter besi putar kelas 0,5 sebagai pembanding telah memperlihatkan bahwa kesalahan pengukuran maksimum dari transduser kumparan rogowski adalah 2,5 %. Transduser ini dapat dikembangkan lebih lanjut sehingga dapat digunakan untuk mengukur arus bolak-balik secara *real-time* dengan mempergunakan teknik pencuplikan (*sampling*) dan penggunaan konverter analog ke digital jenis bipolar yang kompatibel dengan mikrokontroler yang digunakan.

References

- [1] Kojovic L. A. et al. Practical Aspects of Rogowski Coil Applications to Relaying. *IEEE Power System Relaying Committee Special Report*. September 2010
- [2] Rezaee M, and Heydari H. Design Modification of Rogowski Coil for Current Measurement in Low Frequency. *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*. Vol. 6, no. 4, December 2010, pp. 232-237.
- [3] Guerra F. C. F, and Mota W. S. Current Transformer Model. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 22, no. 1, Januari 2007, pp. 187-194.
- [4] Ward D. A., and Exon J. L. T. Using Rogowski coils for transient current measurements. *Engineering Science and Education Journal*. Vol. 2, No. 3, pp. 105-113, Jun. 1993.
- [5] Wentz E. C. *Linear Coupler*. US Patent No. 2,411,403. November 1946.
- [6] Udren E.A. *Overview of IEEE C37.92-2005 Standard for Analog Inputs to Protective Relays from Electronic Voltage and Current Transducers*. IEEE Power System Conference and Exposition, Atlanta, USA. November 2006.
- [7] Argueso M, Robles G, Sanz J. *Measurement of High Frequency Currents with a Rogowski Coil*. Congreso Hispano-Luso de Ingenieria Electrica, 9CHLIE, Marbella, Espana. July 2005.
- [8] Dubickas V, and Edin H. High-Frequency Model of the Rogowski Coil with a Small Number of Turns. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Vol. 56 no.6. December 2007. pp. 2284-2288
- [9] Ramboz J. D. Machinable Rogowski Coil, Design and Calibration. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Vol. 45 no.2. April 1996. pp. 511-515
- [10] Kushnerov A, and Pokryvailo A. *Design of Rogowski Coil with Integrator*. Ben-Gurion University of The Negev. 2006
- [11] Rod Elliott. *Precision Rectifiers*. <http://sound.westhost.com/appnotes/an001.htm>