

## Desain Transduser Rogowski Coil Untuk Pengukuran Arus Frekuensi Tinggi Dan Pulsa Discharge

Herman H Sinaga\*, Hajri Tri Saputra, Diah Permata dan Henry B.H. Sitorus  
Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung, Jl. S. Brojonegoro No 1, Bandar Lampung 35145

\*E-mail korespondensi: herman.h.sinaga@eng.unila.ac.id

**Abstrak.** Salah satu metode untuk mendeteksi sinyal listrik yang berfrekuensi tinggi adalah dengan menggunakan transducer coupling elektromagnetik. Terdapat beragam transducer coupling elektromagnetik, namun dalam penelitian ini akan di desain dan dibuat transducer berjenis "Rogowski Coil" untuk mendeteksi arus listrik frekuensi tinggi dan pulsa discharge. Prinsip dasar Rogowski coil adalah menangkap perubahan medan listrik yang dihasilkan oleh pulsa arus listrik (perubahan besaran arus listrik). Rogowski coil memiliki keunggulan dibanding dengan transducer trafo arus (current transformer – CT). Keunggulan utama Rogowski coil adalah linieritas pengukuran dan bandwidth frekuensi pengukuran yang sangat tinggi dibandingkan dengan CT konvensional. Selain itu Rogowski coil juga relatif tidak mengalami efek jenuh sehingga arus sisi primer dari kumparan Rogowski akan dipetakan secara sempurna pada sisi sekundernya. Konstruksinya juga sederhana dan tidak membutuhkan biaya yang mahal serta pemasangan tidak membebani penghantar yang akan diukur. Dalam makalah ini dibahas desain transducer Rogowski coil dengan inti magnesium dan ferrite yang dapat dipergunakan untuk mendeteksi dan mengukur arus frekuensi tinggi dan pulsa discharge. Rogowski coil dibuat dengan diameter luar 23,49 cm, diameter dalam 13,23 mm dan jumlah belitan 30 lilitan. Kawat kumparan yang dipergunakan mempunyai diameter 0.2 mm<sup>2</sup>. Hasil pengujian memperlihatkan Rogowski coil dengan inti ferrite memiliki sensitivitas yang lebih baik dibandingkan dengan inti magnesium. Kedua tipe inti Rogowski coil dapat dipergunakan untuk mendeteksi arus sampai frekuensi 2 MHz..

**Kata kunci:** Rogowski Coil, transducer kopling elektromagnetik, arus frekuensi tinggi, pulsa discharge

### PENDAHULUAN

Sistem isolasi peralatan listrik dirancang untuk mampu memikul tekanan tegangan dalam level nominalnya dalam jangka waktu yang lama. Namun terkadang, akibat adanya ketidaksempurnaan pada pembuatan isolasi, terdapat cacat pada bagian-bagian isolasi kabel daya tersebut walaupun sistem isolasi melewati semua pengujian sebelum pemasangan dan pengoperasian peralatan listrik tersebut di lapangan. Setelah jangka waktu tertentu, pada bagian isolasi yang tak sempurna tersebut dapat timbul Partial Discharge (PD) sebagai akibat tekanan medan listrik telah melewati ambang batas kristis. Hal tersebut akan mengakibatkan pemburukan yang semakin berat dan meningkatkan kemungkinan terjadinya kerusakan total pada kabel daya.

Salah satu upaya untuk mencegah terjadinya breakdown pada isolasi kabel daya dapat dilakukan dengan memonitor kondisi sistem isolasi terhadap adanya kemungkinan terjadinya Partial Discharge (PD). Pendeteksian terjadinya PD pada sistem isolasi dapat dilakukan dengan mendeteksi produk ikutan yang timbul saat terjadinya PD. Salah satu produk ikutan yang dihasilkan saat terjadi PD pada isolasi kabel daya adalah arus dengan frekuensi tinggi dan pulsa discharge yang memiliki durasi yang sangat singkat.

Dalam hal PD terjadi pada isolasi kabel daya, maka pulsa listrik dihasilkan oleh sumber PD dalam isolasi kabel daya akan menghasilkan sinyal elektrik akan merambat sepanjang kabel. Sinyal elektrik ini dapat dideteksi dengan menggunakan transducer yang sesuai. Sehingga dengan memonitor adanya pulsa elektrik tersebut, kehadiran PD pada sistem isolasi kabel daya dapat diketahui.

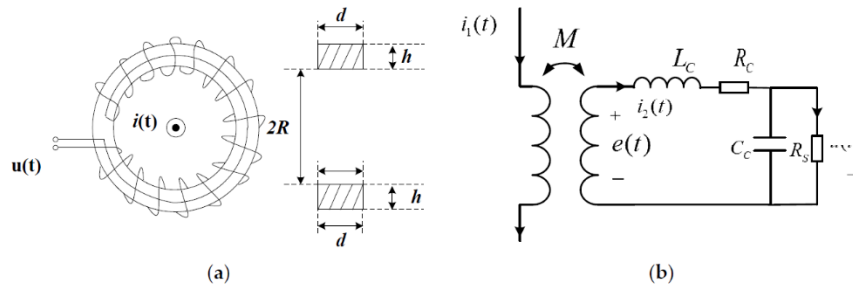
Salah satu transducer yang dapat dipergunakan untuk menangkap sinyal elektrik yang dihasilkan oleh sumber PD adalah dengan mempergunakan transducer coupling elektromagnetik. Dalam penelitian ini akan didesain dan dibuat transducer coupling elektromagnetik berjenis Rogowski Coil. Transducer yang dibuat harus mampu menangkap sinyal PD yang sangat kecil yakni 5 pc (besar Partial discharge yang masih diijinkan berdasarkan standard (IEE Standard, 2015) dengan frekuensi yang mencapai rentang ratusan MHz. Transducer Rogowski coil memiliki bentuk fisik yang hampir sama dengan Current Transformer (CT) biasa. Perbedaan mendasar adalah inti transducer yang digunakan. Pada CT biasa inti besi merupakan bahan yang paling umum dipergunakan. Sedangkan pada Rogowski Coil, intinya hanya udara (atau tanpa inti). Dengan inti udara, maka Rogowski Coil memiliki perbandingan input dan output yang relatif linier untuk semua level arus yang dideteksinya, juga Rogowski Coil memiliki kemampuan rentang frekuensi operasi yang sangat lebar, sampai orde MHz.

Dalam makalah ini dibahas sensor Rogowski coil dengan bahan inti Ferrite dan magnesium. Kedua sensor didesain dengan dimensi yang sama dan diuji kemampuan mendeteksi pulsa dan diuji response frekuensinya.

## METODE PENELITIAN

### Transducer Rogowski Coil

Rogowski coil merupakan salah satu tipe transducer coupling elektromagnetik dengan prinsip yang sama seperti current transformer (CT) biasa. Diagram dasar Rogowski Coil diperlihatkan dalam gambar 1.



**GAMBAR 1.** Rogowski Coil a. Diagram struktur Rogowski coil, b. Rangkaian ekivalen (Liu, et.al, 2016)

Jika resistansi terminal dimisalkan sebagai  $R_s$ , maka rangkaian ekivalen Rogowski coil dapat digambarkan seperti gambar 1.b dan tegangan output Rogowski coil dapat ditulis sebagai (Metwally, I.A, et.al, 2013, Ahmed, A, et.al, 2012) :

$$e(t) = M \frac{di_1(t)}{dt} = L_c \frac{di_2(t)}{dt} + R_c i_2(t) + u(t) \quad (1)$$

$$i_2(t) = C_c \frac{du(t)}{dt} + \frac{u(t)}{R_s} \quad (2)$$

Persamaan (2) disubstitusikan ke persamaan (1) menghasilkan:

$$M \frac{di_1(t)}{dt} = L_c C_c \frac{d^2 u(t)}{dt^2} + \left( \frac{L_c}{R_s} + R_c C_c \right) \frac{du(t)}{dt} + \left( 1 + \frac{R_c}{R_s} \right) u(t) \quad (3)$$

dengan  $C_c$  merupakan kapasitansi terdistribusi,  $R_c$  adalah resistansi coil,  $L_c$  merupakan induktansi-diri coil dan  $M$  merupakan induktansi bersama coil. Karena ukuran Rogowski coil yang kecil, biasanya  $C_c$  diabaikan, sehingga output Rogowski coil dapat dituliskan sebagai :

$$e(t) = L_c \frac{di_2(t)}{dt} + (R_c + R_s) i_2(t) \quad (4)$$

Besar induktansi bersama ( $M$ ) dan induktansi diri ( $L_c$ ) sangat bergantung pada banyak belitan dan dimensi Rogowski coil. Jika Rogowski coil memiliki radius luar sebagai  $R_o$  dan radius dalam sebagai  $R_i$ , maka induktansi bersama ( $M$ ) dapat ditentukan sebagai :

$$M = \sum_{i=1}^{i=n} M_i = \sum_{i=1}^{i=n} N_i \frac{\mu_o h}{2\pi} \ln \frac{R_{oi}}{R_{ii}} \quad (5)$$

dan induktansi diri ( $L_c$ ) dapat ditentukan menggunakan :

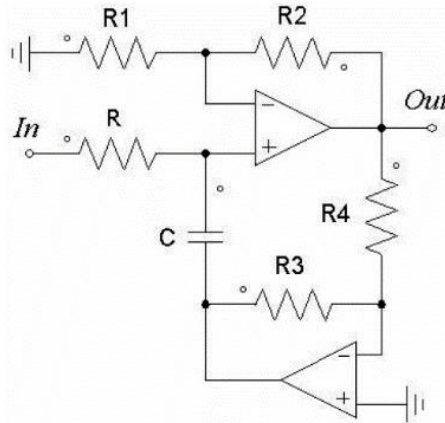
$$L_c = \sum_{i=1}^{i=n} N_i M_i = \sum_{i=1}^{i=n} N_i^2 \frac{\mu_o h}{2\pi} \ln \frac{R_{oi}}{R_{ii}} \quad (6)$$

Sedangkan bandwidth Rogowski coil dapat ditentukan dengan pendekatan berikut (Zhu, et.al, 2005):

$$BW \approx \frac{1}{2\pi} \left( \frac{1}{RC_s} - \frac{R}{L_s} \right) \quad (7)$$

Untuk memperkuat sinyal dan sekaligus untuk menentukan rentang frekuensi operasi, maka Rogowski coil dihubungkan dengan integrator. Dalam (Hemmati, et.al, 2017) menggunakan teknik kompensasi digital untuk memperkuat sinyal pada output Rogowski coil. Hasil penelitian menunjukkan sinyal output Rogowski coil sangat akurat bahkan untuk frekuensi orde puluhan MHz. Namun metode tersebut dapat

mengakibatkan error yang signifikan jika sinyal memiliki bandwidth yang sangat tinggi. Metode tersebut juga membutuhkan komputasi yang tinggi sehingga akan sulit diaplikasikan secara on-line. Dalam (Li, et.al, 2011), Rogowski coil dihubungkan dengan integrator aktif untuk memperkuat sinyal output Rogowski coil. Hasil penelitian menunjukkan permasalahan sensitivitas yang sangat menurun jika kapasitansi dan induktansi Rogowski coil semakin besar. Penurunan sensitivitas dapat dihindari dengan menggunakan integrator pasif (Kushnerov, 2006). Dalam penelitian ini akan didesain dan digunakan tipe integrator pasif. Jumlah tingkatan integrator akan disesuaikan dengan besar output Rogowski coil yang didesain.



**GAMBAR 2.** Integrator pasif RC (Li, et.al, 2011)

### **Integrator Rogowski Coil**

Sinyal output Rogowski coil pada umumnya berada pada orde beberapa millivolt dan memiliki kemampuan bandwidth frekuensi yang tinggi. Namun dalam penggunaannya, Rogowski coil sering memberikan hasil yang kurang akurat terutama pada frekuensi yang sangat tinggi. Pada frekuensi tinggi, pengukuran impulse dapat mengalami overshoot (Hemmati, et.al, 2017; Li, et.al, 2011). Akurasi pengukuran pada frekuensi tinggi dapat diperbaiki dengan mempergunakan integrator. Dalam penelitian ini, integrator yang hendak diteliti adalah integrator pasif RC. Diagram integrator diperlihatkan dalam Gambar 2.

### **Pengujian Pulsa Discharge Dan Arus Frekuensi Tinggi Pada Kabel Daya**

Pengujian dilakukan dengan menggunakan bahan uji Kabel daya. Rogowski coil ditempatkan di salah satu ujung kabel dan input pulsa di injeksikan pada ujung yang lain. Input pulsa dihasilkan oleh sebuah Function Generator. Bentuk pulsa yang dipergunakan adalah pulsa persegi, untuk menirukan pulsa discharge. Sedangkan frekuensi tinggi dihasilkan dalam bentuk fungsi sinusoidal. Kemampuan Rogowski coil menangkap sinyal pulsa dan frekuensi tinggi akan direkam dengan menggunakan sebuah osiloskop. Osiloskop yang dipergunakan memiliki dua saluran input, satu saluran berupa masukan dari output Function Generator dan satu saluran yang lain dipergunakan untuk merekam pulsa yang ditangkap oleh Rogowski coil.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Dimensi dan elemen Rogowski Coil**

Perancangan desain pengukuran arus berfrekuensi tinggi menggunakan transduser Rogowski coil terbuat dari bahan inti toroid ferrit, kawat tembaga dan rangkaian integrator RC pasif. Integrator digunakan agar coil dapat menangkap arus output dengan kinerja yang lebih tinggi, sehingga menggunakan induktansi diri untuk integrasi pasif.

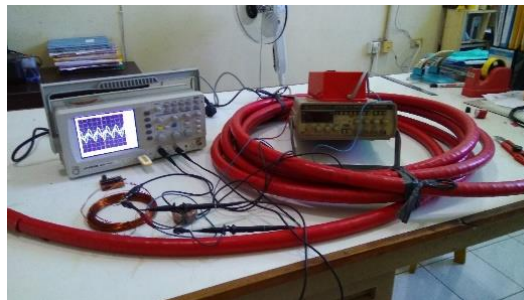
### **Response Rogowski Coil Terhadap Arus Frekuensi Tinggi dan Pulsa Discharge**

Pengujian dilakukan dengan menggunakan diagram rangkaian seperti gambar 3, dan pengujian di laboratorium ditunjukkan dalam Gambar 3. Pengujian pulsa discharge dilakukan dengan memberikan input persegi yang menirukan sinyal pulsa dengan waktu muka yang sangat cepat. Sinyal pulsa dihasilkan oleh sebuah Function Generator (FG) dan sebuah osiloskop dengan bandwidth frekuensi 200 MHz dipergunakan untuk menangkap response Rogowski Coil yang telah dibuat. Gambar 4 menunjukkan tipikal sinyal output Rogowski Coil dengan input pulsa. Terlihat bahwa sinyal pulsa dengan waktu muka yang sangat cepat ditangkap oleh Rogowski Coil dengan bentuk gelombang yang beresilasi dengan durasi waktu yang

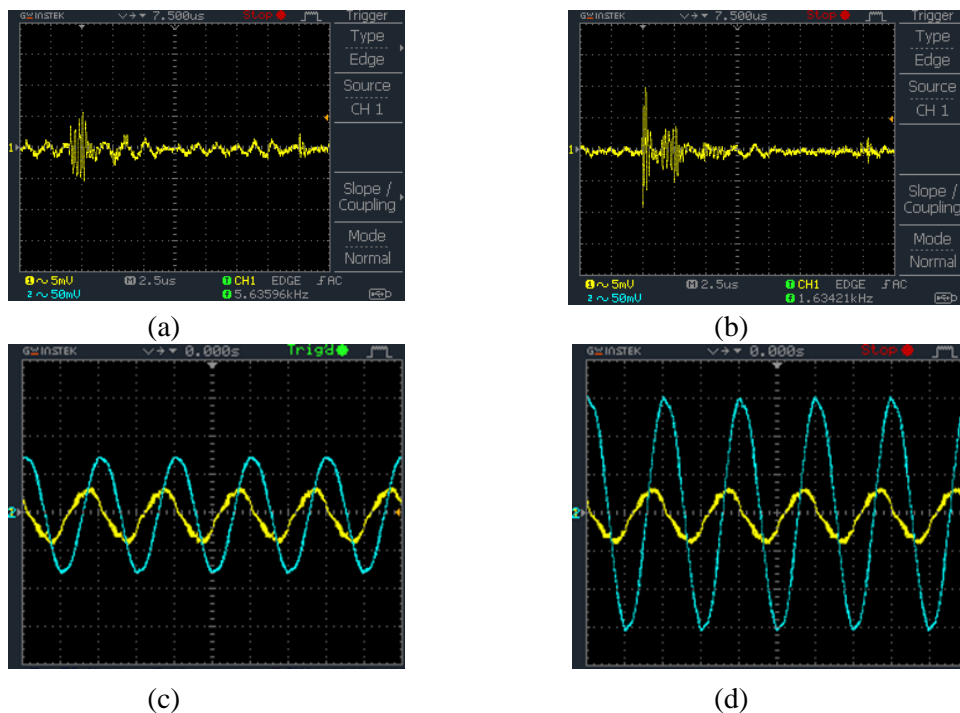
singkat. Response pulsa discharge berbahan Ferrite menunjukkan pengukuran dengan magnitudo yang lebih tinggi dibandingkan bahan Manganese. Hal ini terjadi karena sifat paramagnetic Ferrite yang lebih baik dari Magnesium.

**TABEL 1.** Spesifikasi Rogowski coil berintikan ferrite dan magnesium.

No	Spesifikasi Rogowski	Inti Ferrite	Inti Magnesium
1	Diameter luar	45 mm	68 mm
2	Diameter dalam	30 mm	50 mm
3	Tebal teroid	9,71 mm	20 mm
4	Lebar teroid	10 mm	8 mm
5	Jari-jari teroid	15 mm	25 mm
6	Diameter teroid	0,2 mm	0,2 mm
7	Jari-jari kawat	0,1 mm	0,1 mm
8	Jumlah lilitan	30	30
9	Luas tampang koil Rogowski	48,mm	51 mm
10	Permeabilitas relatif	200	6256
11	Permeabilitas udara	$4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A.m}$	$4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A.m}$
12	Induktansi teroid terukur	$0,275 \times 10^{-3} \text{ H}$	$1,963 \times 10^{-3} \text{ H}$
13	Ntegrator pasif	R1=200k $\Omega$ , R2=9.8 k $\Omega$ , R3=9.8 k $\Omega$ , C=0.25 $\mu\text{F}$	R1=200k $\Omega$ , R2=9.8 k $\Omega$ , R3=9.8 k $\Omega$ , C=0.25 $\mu\text{F}$



**GAMBAR 3.** Pengujian Rogowski coil dengan input dari Function Generator



**GAMBAR 4.** Hasil pengujian Rogowski coil (a) response pulsa discharge inti Magnesium dan (b) inti Ferrite, (c) response frekuensi inti Magnesium dan (d) inti Ferrite

Pengujian arus sinusoidal menunjukkan hasil pengujian yang hampir sama. Kedua inti belitan menghasilkan gelombang yang hampir sama, baik magnitude dan frekuensinya. Gelombang output keduanya terlihat tidak *smooth* seperti gelombang input (Gambar 4). Hal ini menunjukkan kedua coil yang dibuat masih memiliki kesalahan pabrikasi yakni ketakseragaman jarak antar belitan, karena proses pembelitan dilakukan secara manual. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan terlihat bahwa inti Ferrite relatif memiliki kemampuan yang lebih baik sebagai inti Rogowski Coil.

### KESIMPULAN

Penggunaan transduser Rogowski coil dengan inti magnesium dan ferrite untuk mendeteksi dan mengukur arus frekuensi tinggi dan pulsa discharge di bahas dalam makalah ini. Rogowski coil dibuat dengan diameter luar 23,49 cm, diameter dalam 13,23 mm dan jumlah belitan 30 lilitan. Kawat kumparan yang dipergunakan mempunyai diameter 0.2 mm<sup>2</sup>. Hasil pengujian memperlihatkan Rogowski coil dengan inti ferrite memiliki sensitivitas yang lebih baik dibandingkan dengan inti magnesium. Kedua tipe inti Rogowski coil dapat dipergunakan untuk mendeteksi arus sampai frekuensi 2 MHz dengan response yang hampir sama.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah mendanai penelitian ini melalui skema penelitian DIPA Fakultas 2018.

### DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, A.; Coulbeck, L.; Castellazzi, A.; Johnson, C.M. (2012); Design and test of a PCB Rogowski coil for very high dI/dt detection. *In Proceedings of the 2012 15th Conference on International Power Electronics and Motion Control (EPE/PEMC)*, Novi Sad, Serbia, 4–6 September 2012.
- Hemmati, E and Shahrtash, S. M. (2013); Digital Compensation of Rogowski Coil's Output Voltage; *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, Vol. 62, No. 1, January 2013
- IEEE Standard, (2015); *IEEE Guide for Partial Discharge Testing of Shielded Power Cable Systems in a Field Environment*, IEEE Standards Project P400.3/D5 (PE/IC), draft 11.
- Kushnerov; A. (2006); Design of Rogowski coil with integrator; *Project Report*, Ben-Gurion University, 2006
- Li, Z.; Zhang, Q., Zhang, L., Liu, F., Tan, X.. (2011); Design of Rogowski Coil with external integrator for measurement of lightning current up to 400kA; *Przełąd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, ISSN 0033-2097, R. 87 NR 7/2011; pp188-182
- Liu, Y., Xie, X., Hu, Y., Qian, H., Sheng, G. and Jiang, X. (2016) ; A Novel Transient Fault Current Sensor Based on the PCB Rogowski Coil for Overhead Transmission Lines; *Sensors* 2016, 16, 742.
- Metwally, I.A. (2013); Design of different self-integrating and differentiating Rogowski coils for measuring large-magnitude fast impulse currents. *IEEE Transaction of Instrumentation Measurement*, 2013, 62, 2303–2313.
- Zhu, J.; Yang, L., J. Jia and Q. Zhang; (2005); The Design of Rogowski Coil with Wide Band Using for Partial Discharge Measurements, *Proceedings of 2005 Intemational Symposium on Electrical Insulating Materials*, June 5-9, 2005, Kitakyushu, Japan, pp. 518-521.