

Aplicações do sensor de fluxo magnético – Bobina de Rogowski – na medição da corrente alternada e contínua de alta intensidade, em campo, em barramentos blindados de até 2,7 metros de diâmetro

Applications of magnetic flux sensor - Rogowski coil - in the measurement of alternating and direct current of high intensity in the field, in shielded busbars of up to 2.7 meters in diameter

Márcio Antônio Sens

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Eletrobrás Cepel

E-mail: sens@cepel.br

Resumo: A bobina de Rogowski tem sido utilizada desde 1911, e se constitui num sensor de fluxo magnético de extrema linearidade para a medição de correntes elétricas, em qualquer frequência, incluindo a corrente contínua. Aplicações do Setor Elétrico levaram à construção de bobinas longas para medições em barramentos blindados de até 2,7 metros de diâmetro. Necessidades industriais, onde barramentos irregulares portam correntes contínuas de milhares de ampères, onde os sensores por efeito Hall não tiveram êxito com a incerteza requerida, da mesma forma, levaram à aplicação da bobina de Rogowski. O Artigo descreve a construção e as aplicações dos citados sensores.

Palavras-chave: Rogowski; bobina; corrente; alternada; contínua.

Abstract: The Rogowski coil has been used since 1911, and constitutes a magnetic flux sensor of extreme linearity for measuring electrical currents at any frequency including DC. Applications in power plant led to the construction of long coils for measurements in shielded busbars of up to 2.7 meters in diameter. Industrial needs where irregular busbars carry direct currents of thousands of amperes, where by Hall Effect sensors have not been successful with the required uncertainty, in the same way, led to the application of the Rogowski coil. The article describes the construction and applications of these coils.

Keywords: Rogowski; coil; current; alternating; direct-current.

1 INTRODUÇÃO

A bobina de Rogowski tem sido utilizada desde 1911 nas mais variadas aplicações de medidas

elétricas e magnéticas, e se constitui num sensor de fluxo magnético de extrema linearidade para a medição indireta de correntes elétricas, em qualquer frequência, incluindo em corrente contínua. Aplicações do Setor Elétrico de geração

levaram à construção de bobinas longas, da ordem de 8,5 metros de comprimento, para medições em barramentos blindados de até 2,7 metros de diâmetro.

Algumas necessidades industriais, onde barramentos irregulares e contorcidos portam correntes contínuas da ordem de milhares de ampères, e onde os sensores por efeito Hall não tiveram êxito com a incerteza requerida, da mesma forma, levaram à aplicação da bobina de Rogowski para a melhor estimativa das correntes circulantes em processos eletrolíticos. O Artigo descreve a construção e as aplicações típicas dos citados sensores denominados de bobinas de Rogowski.

2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O princípio de funcionamento da bobina de Rogowski é bastante conhecido e divulgado. Mesmo assim cabe lembrar que opera pelos princípios das Leis da Faraday e de Ampère, onde a variação do fluxo magnético enlaçado pelo núcleo da bobina, no sentido perimetral, gera uma tensão induzida nos terminais da mesma. A integração temporal desta tensão leva ao fluxo magnético concatenado e, por relação direta, à corrente elétrica que o produziu, equação (1). Uma revisão sobre tal princípio e algumas aplicações básicas são encontradas na recente publicação^[1], que incorpora outras 54 referências bibliográficas. A corrente resultaria:

$$i = \frac{1}{\mu_0 \cdot S \cdot n} \cdot \int edt \quad (1)$$

Onde S= área da espira; n=espiras por metro.

A técnica de Rogowski não havia sido sugerida até 1912 para a medição de correntes de elevada intensidade, sendo até então utilizado apenas a medição da queda de tensão sobre resistores shunt^{[2], [3]}.

Por outro lado, os shunts não permitem medições isoladas do circuito sob avaliação e assim como os sensores tipo Hall que captam fluxos magnéticos das vizinhanças, ambos interferem na corrente a ser avaliada.

Transformadores de corrente, nas várias modalidades, incluindo anexos a amperímetros tipo alicate, têm limitações de aberturas para passagem de grandes barramentos e, da mesma forma, interferem na corrente a ser medida, ou seja, podem alterar – reduzir a corrente do circuito em análise. A bobina de Rogowski, por operar praticamente em aberto, provoca a mínima interferência no circuito, comparada aos demais sensores.

3 BARRAMENTOS BLINDADOS DE ATÉ 35 kA COM 2,5 m DE DIÂMETRO

Uma aplicação típica, desafiante, surgiu com a necessidade de medições de altas correntes em barramentos blindados, trifásicos, de uma usina de 1,3 GW. Barramentos blindados são utilizados para segurança, visam blindar os campos elétricos e magnéticos, encerrando-os num invólucro tubular de alumínio, como na [Figura 1](#).

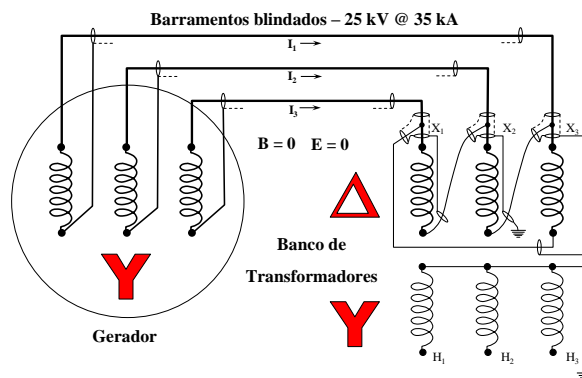


Figura 1 – Blindagem Eletromagnética de Barramentos.

Em uma inspeção de rotina, detectou-se que um transformador do banco de transformadores apresentava uma corrente para o terra da ordem de 500 a 600 A, em 60 Hz. Tal fato era preocupante e foi cogitada a hipótese de se verificar possíveis desequilíbrios nas correntes dos barramentos tubulares trifásicos, blindados. Ocorre que tais barramentos eram de mais de 2 metros de diâmetro. Em alguns segmentos dos barramentos não havia blindagem magnética, apenas elétrica, ou seja, haveria fortes campos magnéticos alternados externos.

A medida adotada foi construir uma bobina de

Rogowski com aproximadamente 8,5 metros de comprimento, para enlaçar todo o barramento.

A Figura 2 mostra o tamanho da bobina, durante a fase de calibração em corrente alternada.



Figura 2 – Bobina de Rogowski com 8,5 metros de comprimento.

Assim foi feito e com apenas uma bobina foi possível medir as correntes dos barramentos, em segmentos blindados magneticamente e em segmentos sem blindagem. As medições foram realizadas em amplitude e fase, porém em instantes distintos.

As medições foram realizadas em instrumento portátil, incluindo o integrador analógico, e uma tensão de referência, de uma tomada da subestação, foi utilizada para sincronismo e referência do ângulo de fase. A mesma fonte de referência foi utilizada para todas as medições, embora os pontos de medidas distanciassem entre si cerca de 30 metros. Um cabo coaxial foi utilizado para o sinal de referência, para minimizar a captação de interferências e o instrumento foi mantido distante dos campos magnéticos mais elevados dos transformadores.

Identificou-se que as correntes para o terra eram oriundas do desequilíbrio. A Figura 3 mostra um dos barramentos condutores de transformador sem blindagem magnética sendo laçado pela Rogowski de 8,5m de comprimento.



Figura 3 – Segmento de Barramento sem Blindagem Magnética sob Medição.

Outra aplicação, também para barramentos condutores elétricos tubulares de blindagens, houve a necessidade de se identificar as causas do superaquecimento nas conexões aparafusadas das mesmas. Três sensores Rogowski de 3,5 m de comprimento foram construídos para a medição simultânea dos barramentos trifásicos. Os resultados das correntes nos condutores e nas blindagens são mostrados na Figura 4.

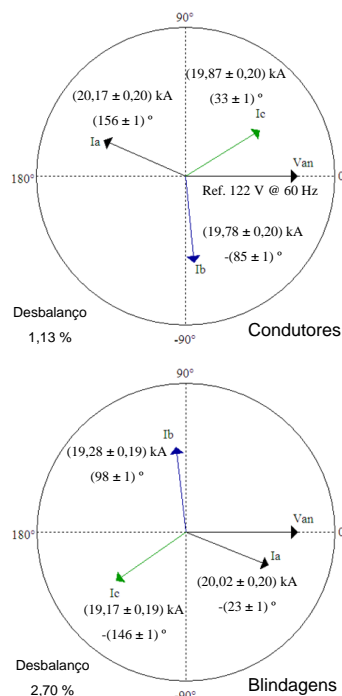


Figura 4 – Correntes resultantes, medidas com Rogowski de 3,5 m de comprimento.

Concluiu-se, pelas medições, que as conexões elétricas não eram suficientes para comportar a corrente 25 kA de plena carga da usina. Sugeriu-

se, com sucesso, a substituição do sistema de conexões elétricas de parafusos por soldas.

4 MEDIÇÃO DE CORRENTE CONTÍNUA DE ATÉ 100 kA

Outra aplicação típica vivenciada foi a medição de altas correntes em um processo industrial envolvendo eletrodeposição metálica, em corrente contínua. Os barramentos eram entrelaçados e muito próximos uns dos outros. Medições com sensores tipo Hall não lograram êxito, pela interação dos campos magnéticos de barramentos vizinhos ao sob avaliação. Os sensores Hall indicavam correntes apenas pela aproximação do sistema de medição com os barramentos, sem o enlace. Neste caso, o único sistema portátil viável foi a bobina de Rogowski, cuja calibração é mostrada na Figura 5.

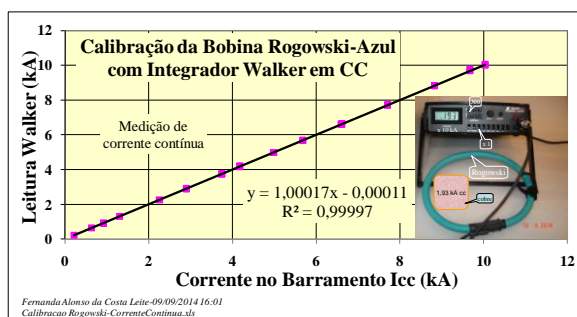


Figura 5 – Calibração da bobina de Rogowski em corrente contínua.

A corrente elétrica foi avaliada por um fluxímetro magnético digital, comercialmente disponível, com excelente linearidade até 10 kA, entretanto, pelas duas escalas ainda disponíveis, superiores, do instrumento, as correntes poderiam ser medidas até a ordem de 100 kA.

5 MEDIÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTES EM CABOS ACSR DE TRÊS CAMADAS

Um cabo condutor elétrico de alumínio, denominado *Duck*, com alma de aço, bitola 605 MCM, contendo 54 fios de alumínio, dispostos em três camadas distintas, precisava ser avaliado quanto à distribuição das correntes entre camadas. Para isto, os fios foram separados,

como mostrado na Figura 6, por separador.

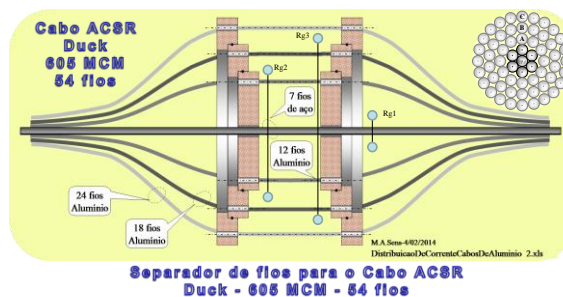


Figura 6 – Abertura do Cabo Duck para uso de Rogowski entre camadas.

Medições individuais foram experimentadas, através de sensores tipo alicata, próprios para osciloscópios. Entretanto, como a corrente total era da ordem de mil ampères, não se tinha estabilidade suficiente entre leituras de fios distintos, inclusive pela instabilidade térmica. Era necessária a medição simultânea dos 54 fios. Além disto, a introdução do sensor, magnético, alterava a corrente sob avaliação. Desta forma, experimentou-se a instalação de 54 sensores tipo transformador de corrente, um em cada fio. Também foi difícil a operação, pois a incerteza entre sensores podia variar em mais de 2 % e as leituras não eram tomadas simultaneamente.

Desta forma foram utilizados, novamente, três sensores tipo Rogowski, para a avaliação da corrente de cada camada de fios, permitindo a identificação da corrente em amplitude e fase, com êxito e com incerteza inferior a 1,5 %.

6 REFERÊNCIAS

- [1] Samimi, M.H. Dept. of Electr. & Comput. Engineering Faculty Univ. of Tehran, Iran Mahari, A. ; Farahnakian, M.A. ; Mohseni, H. "The Rogowski Coil Principles and Applications: A Review" - Browse Journals & Magazines - Sensors Journal, IEEE; Volume:15 Issue:2; pag. 651 – 658; 14 Outubro 2014.
- [2] Gerard, Eric Mary, "Mesures Eletriques", Gauthier-Villars Éditeur, Paris, 1901.
- [3] Thompson, Sylvanus P., paragraph 412 in "Elementary Lessons in Electricity & Magnetism", The Macmillan Company, London, 1912.