

INFLUÊNCIA DAS CORRENTES GEOMAGNETICAMENTE INDUZIDAS EM TRANSFORMADORES DE CORRENTE

Artur H. Rodrigues, Eduardo M. dos Santos, Ana P. Lorenzoni, Arian R. Fagundes, Mateus C. Franco
Grupo de Energia e Sistemas Elétricos de Potência, Universidade Federal do Pampa
Av. Tiarajú, 810 – Bairro: Ibirapuitã - Alegrete – RS – CEP: 97546-550

E-mails: artur.ar.10@gmail.com; eduardosantos@unipampa.com; applorenzoni@gmail.com; a.rodriguesfagundes@gmail.com; mateusfranco1998@gmail.com

Abstract — The geomagnetic induced currents (GICs) are currents that occur due to movement of ionized particles in the earth's magnetic field. The solar flares cause the discharge of ionized particles in the space, wherein a portion of these charges are ajected toward the Earth, modifying the magnetic field inducing current mirror surface. The GICs have the feature very low frequency, almost continuous, with average amplitude ranging between 0 and 15 but are peaks that can reach 100 A. The duration of the current ranges between a few milliseconds to a few minutes. For a long time electrical engineers believed that GICs were problems only electrical systems at high latitudes. However, in recent years it is speculated that the causes are for various shutdowns unscheduled in Brazil this is due to an anomaly in the South Atlantic. Given this situation this study aims to verify the impact of GICs on current transformers (CTs). The circuit was implemented in software EMTP-ATP, from the simulation it was observed that the CT saturates faster for low frequency GICs.

Keywords — *Current Transformers, Magnetic field, South Atlantic Anomaly.*

I. INTRODUÇÃO

O campo magnético do planeta Terra funciona como uma barreira que impede as partículas carregadas eletricamente de chegar a superfície do planeta. O movimento ordenado dessas partículas no campo magnético faz com que as correntes elétricas sejam induzidas na superfície da terra. Essas correntes são conhecidas como GICs (Correntes Geomagneticamente Induzidas).

As GICs são caracterizadas por frequências muito baixas, inferior a 1 Hz, ou seja frequência quase contínua [1]. A presença dessas correntes pode afetar o funcionamento de sistemas de comunicação, de satélites, ou até mesmo sistemas elétricos de potência.

Esse fenômeno é Comum no hemisfério Norte, devido à presença de maior intensidade de campo magnético. No Canadá alguns blecautes foram causados pela circulação de GICs no sistema elétrico de potência. Algum tempo atrás acreditava-se que as GICs não ocorriam na América do Sul, todavia, existe uma anomalia geomagnética que distorce a magnetosfera, facilitando a ocorrência das GICs na superfície terrestre.

No sentido de sistemas elétricos de potência, as GICs entram nas linhas de transmissão através dos aterramentos. As GICs também causam a saturação do núcleo dos

transformadores de corrente, alterando os sinais de corrente e tensão, que pode levar a atuação indevida dos relés de proteção. Além disso, o aquecimento do núcleo do TC aliado a danificação dos seus isolamentos pode causar incêndio e explosões nos transformadores. Um transformador com seu núcleo saturado consome mais reativos, levando a quedas de tensão, que em alguns casos pode levar a um colapso de tensão [2].

O sistema teste foi desenvolvido e implementado no software EMTP-ATP, esse software permite a inserção de correntes contínuas e alternadas de frequências muito baixas, circulando na LT ou no aterramento do relé, essa corrente adicionada simula a ocorrência de GICs. Por meio desse sistema, foi possível obter o desempenho do TC através da corrente de magnetização entregue nos terminais do secundário.

Alguns distúrbios na rede provocam a suspensão do fornecimento de energia, gerando prejuízos para os consumidores e também para as empresas que são responsáveis pela demanda de energia elétrica. Nesse contexto, o estudo tem como objetivo verificar a influência das GICs em transformadores de corrente, que podem ser úteis para explicar o motivo de algumas suspensões não programadas de energia elétrica.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

A. GICs no sistema elétrico de potência

As perturbações geomagnéticas mais comuns são provocadas por explosões solares, nos quais as massas coronais deformam o campo magnético terrestre, promovendo o surgimento das correntes em altas latitudes que induzem as GICs.

As GICs entram nos sistemas elétricos de potência através dos aterramentos dos dispositivos de proteção que compõem o sistema, conforme pode ser observado na Fig. 1.

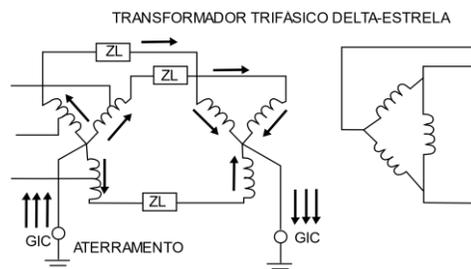


Fig. 1. GIC no sistema elétrico de potência.

A presença das GICs em uma rede elétrica é somada a corrente já existente no sistema, causando deslocamentos nas formas de onda de corrente (offsets). Essa elevação de corrente aumenta o desgaste dos equipamentos. O resultado das GICs sobre o Sistema Elétrico de Potência (SEP) é o desligamento indevido do fornecimento de energia, que ocorre devido as sobrecargas observadas pelos dispositivos de proteção.

B. Anomalias geomagnéticas do atlântico sul

O campo magnético da terra atua no sentido de proteger o planeta contra algumas atividades solares. Todavia, essa proteção não se dá por completo, pois o campo magnético é mais fraco nas regiões próximas ao Equador e mais fortes quanto mais próximas dos polos. Deste modo, países tropicais, como por exemplo o Brasil seriam menos sensíveis a esses fenômenos magnéticos, entretanto, esse pensamento não é correto devido a uma Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul, denominada pela sigla AGAS.

A região da AGAS é onde os cinturões de radiação ao redor do planeta estão mais próximos da superfície, havendo um aparente enfraquecimento do campo magnético, facilitando a entrada de partículas ionizadas. A AGAS pode ser relacionada com o fato do centro do campo magnético estar deslocado aproximado 450km do centro geográfico.

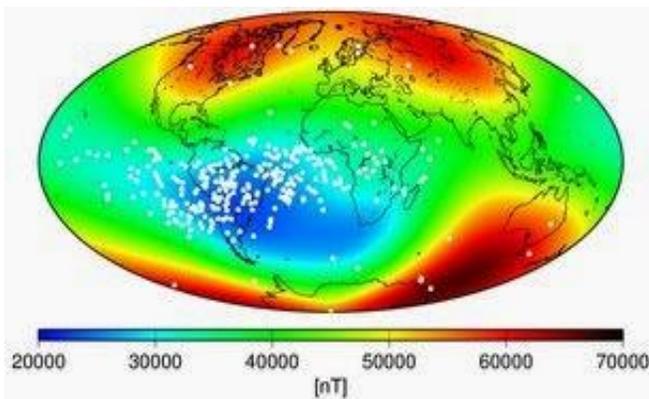


Fig. 2. Anomalia Magnética do Atlântico Sul.
Fonte: NASA, 2014.

A Fig. 2 mostra essa região de Anomalia Magnética do Atlântico Sul. As áreas vermelhas representam os locais onde o campo magnético é mais forte, enquanto que as áreas azuis retratam a diminuição na intensidade. O Brasil se encontra na região onde o campo magnético sofre o enfraquecimento, e por isso, acredita-se que o país esteja sendo alvo de eventos geomagnéticos. Muitas falhas sem explicação ocorridas em nosso sistema elétrico podem ter sido ocasionadas por estes fenômenos [3].

C. GICs no Brasil

Grande parte da América do Sul está localizada na região que compreende a chamada anomalia do atlântico sul. Desta forma, os estados do sul do Brasil pertencem a esta região de anomalia, inclusive o Rio Grande do Sul.

Em dezembro de 2000, várias subestações importantes do Brasil sofreram falhas, entre elas: São José (Furnas), Adrianópolis (Furnas), Magé (CERJ), subestação Frei Caneca (Rio de Janeiro), Ivaiporã (Paraná), Cabreúva (São Paulo), causando transtornos. Vale ressaltar que não haviam nenhum indício de descarga atmosférica, ou outro motivo que pudesse explicar tais perturbações no sistema.

Essas perturbações podem estar relacionadas com as correntes geomagneticamente induzidas, em seu estudo foi observado que no período das falhas ocorreram variações no campo magnético, fortalecendo a possibilidade da presença da GICs na rede elétrica [3].

No Rio Grande do Sul acredita-se que atuações frequentes e sem causa na linha de transmissão de Alegrete – Santa Maria podem estar relacionadas à GICs. Na maioria dos casos as GICs são de curta duração e de baixas magnitudes, ou seja, não são percebidas pelos dispositivos de proteção, aumentando os desgastes dos.

D. Consequências das GICs em transformadores

Um efeito grave gerado pela presença de GICs é a excitação nos transformadores, o mesmo possui um circuito magnético que pode ser rompido pela presença de GIC no sistema. Esse campo é produzido por um pulso eletromagnético, que desloca o ponto de operação do circuito magnético, ocorrendo a saturação do núcleo. Isso leva a produção de correntes harmônicas que distorcem as tensões e provocam a atuação dos relés [4]. Além disso, a saturação do núcleo provoca o aquecimento danificando os isolamentos.

Quando a GIC causa saturação do núcleo do transformador e o mesmo opera com o núcleo saturado, há um consumo maior de reativos, que causam quedas de tensão, podendo acarretar em um colapso no sistema. Por outro lado, nos geradores as GICs podem provocar problemas como variações anormais das potências ativa e reativa geradas, desbalanceamento de correntes nas fases e distorções harmônicas nas tensões resultantes dos transformadores.

Quando os sistemas são interligados o risco é ainda maior. Os transformadores com o núcleo saturado podem injetar harmônicas no sistema elétrico de potência e consumir um número alto de reativos. Com isso, podem levar a sobrecarga de capacitores, forçando assim o desligamento dos sistemas interligados. Além disso, a presença das GICs causa a saturação do núcleo do TC em alguns milissegundos, como será observado na seção 4.

III. METODOLOGIA

Para a avaliação do desempenho do transformador de corrente sob influência das GICs, foram obtidos os sinais de corrente de magnetização e os sinais de corrente entregues a carga conectada ao secundário do transformador. Os sinais foram gerados para diferentes magnitudes (10 A, 20 A, 50 A) e frequências (0 Hz, 0.1 Hz) da GIC. A partir dessa metodologia pretende-se verificar o comportamento dos TC sob influência de correntes com frequências contínuas ou quase contínuas, características das correntes geomagneticamente induzidas.

A. Dados iniciais utilizados na simulação

Na análise do desempenho dos dispositivos destinados a proteção de SEP sob influência das correntes geomagneticamente induzidas desenvolveu-se dois sistemas teste. Nos dois sistemas foram utilizados parâmetros da linha de transmissão de 138kV, entre as cidades de Alegrete e Santa Maria, nomeada então como, ALE SE-SMA 1, sendo 197km de comprimento (ANEEL, 2016). Essa LT é feita por cabos do tipo CAA Lark 397.5, e apresentam resistência de $0.1703\Omega/\text{km}$ e reatância de $0.3599\Omega/\text{km}$, como pode ser verificado na Fig. 3.

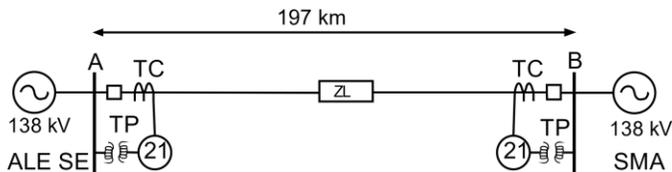


Fig. 3. Diagrama unifilar da linha de transmissão.

Os sistemas testes foram simulados no software EMTP-ATP®. Tais sistemas são compostos por uma linha de transmissão, sendo ela representada por um bloco RLC, com fontes equivalentes nos dois terminais, 138 kV. Todavia, as fontes apresentam uma defasagem que varia de -60° a 60° , com passo de 15° de maneira a estabelecer o sentido e as magnitudes do fluxo de potência.

No terminal da barra B, foi conectado um TC C400 com relação de transformação 2000:5 A, composto por um transformador ideal com um indutor tipo-96 conectado em paralelo aos seus terminais secundários, além de um ramo RLC representando a impedância equivalente do TC referido ao secundário. O ramo de magnetização do TC é representado pelo indutor, para o qual também estipulada uma curva de excitação, gerada pelo próprio software EMTP-ATP®.

O modelo de indutor tipo-96 do EMTP-ATP® permite o controle do fluxo remanescente de Corrente Alternada (CA) no núcleo do TC, isso acontece por que a frequência das GICs é muito baixa, quase contínua, e por isso esse fluxo remanescente foi desprezado nos testes. Por outro lado, a carga do TC (relé) é representada por um bloco RLC com impedância de $4\ \Omega$ e com fator de potência unitário, ou seja, simulando um relé digital.

B. Circuitos para análise do desempenho do TC sob a influência de GICs

Para a análise do desempenho do transformador de corrente sob o efeito das GICs, desenvolveu-se um sistema teste, conforme é mostrado na Fig. 4. No sistema foram acrescentadas duas correntes com duração controlada, sendo a primeira com uma fonte de corrente contínua Fig. 4-a e a segunda uma fonte de corrente alternada Fig. 4-b, porém com frequência muito baixa. A partir dessas simulações obteve-se os sinais de corrente secundária total, de corrente de magnetização e de corrente na carga de um TC. A simulação teve como objetivo verificar a capacidade do TC de reproduzir

as características do respectivo sinal no primário para sua carga.

Para que fosse possível a circulação da GIC pelo primário do transformador, a impedância das fontes e da linha de transmissão foram acumuladas no bloco RLC conectado à fonte do terminal sem medição. Esse bloco RLC conectado a um dos terminais primários do transformador é representado por uma impedância infinitesimal, sendo as quedas de tensões desprezíveis, essa impedância foi inserida no sistema somente para auxiliar o programa com relação a divisão de corrente acrescida ao sistema, evitando o ponto flutuante.

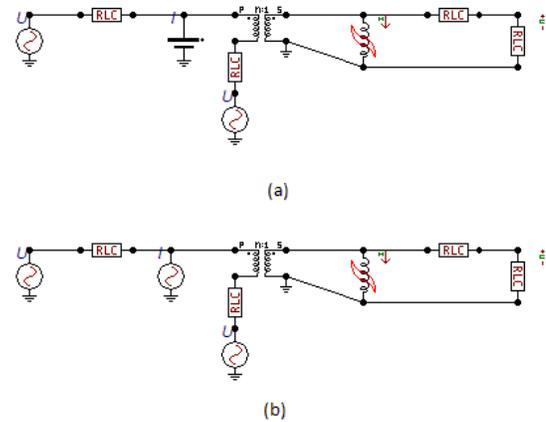


Fig. 4. Sistema teste desenvolvido para simular GIC circulando na LT (a) GIC contínua (b) GIC alternada.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta parte serão mostrados os resultados a partir da metodologia apresentada anteriormente, tendo como foco os efeitos das GICs em transformadores de corrente (TC). É importante ressaltar que os valores de corrente não são referentes a correntes reais induzidas na LT.

A. Caso 1 – GIC contínua de 20 A na LT

A primeira simulação feita foi com uma GIC de 20 A circulando em uma linha de transmissão, com duração de 1,5 segundos. A Fig. 5 apresenta o sinal de corrente secundária total, o qual deveria passar pela carga do TC apenas com erro de transformação equivalente à corrente de magnetização do núcleo.

Por outro lado, a Fig. 6 mostra o sinal de corrente secundária que passa pela carga do TC (azul) e a corrente de magnetização do núcleo (vermelho). É possível perceber que componente contínua, ou seja, a GIC provoca a saturação do TC em alguns milissegundos, isso causa a distorção na forma de onda do sinal de corrente passado à carga do TC, sendo o pico de 0.1728 A em 0.5158 segundo. O transformador de corrente é mantido saturado durante todo período da GIC. Com o efeito da GIC a corrente no ramo de magnetização cresce, já que a corrente alternada é somada com a componente de corrente contínua gerada pela GIC, distorcendo a forma de onda do sinal no secundário do TC. Após a GIC ser eliminada somente circula a componente CA do sinal nesse ramo. Dessa maneira, a componente de

magnetização cresce, já que a componente CA dessa corrente se soma a componente CC gerada pela GIC, ocasionando a distorção da forma de onda do sinal passado à carga no secundário do TC.

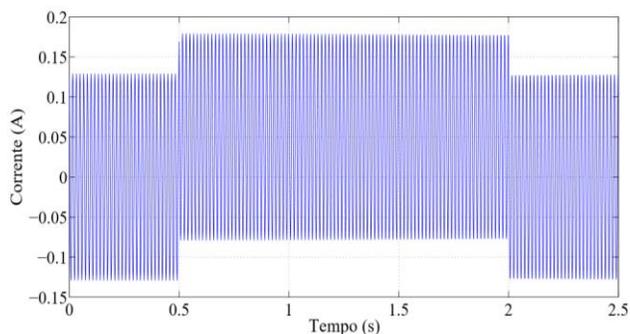


Fig. 5. Sinal de corrente secundária total para GIC de 20 A, tendo duração de 1.5 segundos.

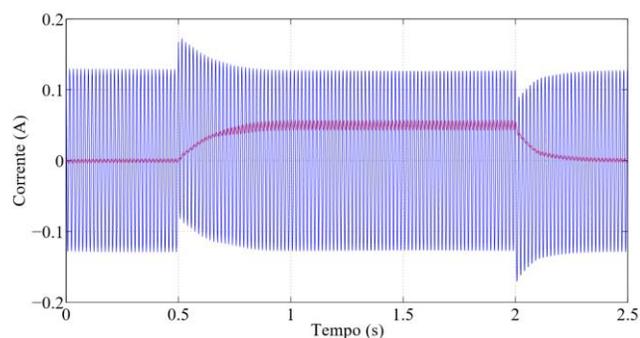


Fig. 6. Sinal de corrente secundária na carga do TC (azul) e corrente no ramo de magnetização (vermelho) para GIC de 20 A.

Após o fim da GIC a interferência causada por essa corrente ainda segue distorcendo a forma de onda do TC, até todo fluxo CC remanescente seja eliminado do núcleo. O TC retorna a sua operação normal após 0.307s do fim da GIC. Como pode ser observado na Fig. 6. Em decorrência da característica de magnetização do TC, a corrente secundária total que reproduz as características da forma de onda do sinal primário, é filtrada e a componente contínua gerada pela GIC circula no ramo de magnetização do TC. Isso ocorre uma vez que o fluxo magnético CC é sobreposto ao fluxo CA. Por esse motivo o núcleo magnético do transformador satura assimetricamente, provocando uma distorção na componente contínua do sinal de corrente secundária.

B. Caso 2 – GIC contínua de 50A na LT

Para uma GIC de 50 A na linha de transmissão com duração 1,5 s, o resultado é semelhante ao ocorrido no caso anterior, como pode ser verificado na Fig. 7 e Fig. 8. Nesse caso, a GIC provoca a saturação no TC em poucos milissegundos, causando a distorção na forma de onda, sendo o pico de 0.2407 A em 0.5002 s. Assim como no caso anterior o TC apresenta-se saturado durante todo o período de duração da GIC. O sinal apresenta um decaimento com sua envoltória, o qual possui duração de 0.2155 s, após esse tempo a referida corrente é praticamente eliminada da forma de onda passada à

carga, portanto, somente a parte CA do sinal circula pelo ramo.

Após o fim da GIC a interferência causada por essa corrente ainda segue distorcendo a forma de onda do TC, até todo fluxo CC remanescente seja eliminado do núcleo. O TC retorna a sua operação normal após 0.307s do fim da GIC.

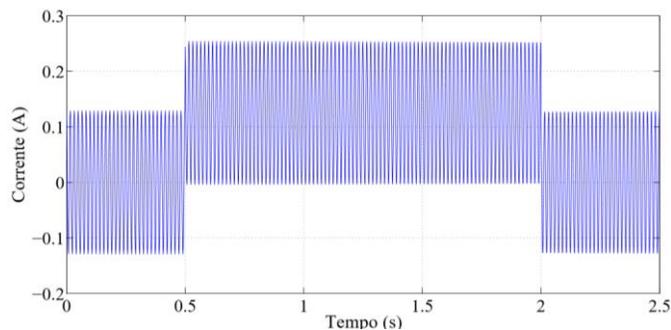


Fig. 7. Sinal de corrente secundária total para GIC de 50 A com duração de 1,5 segundos.

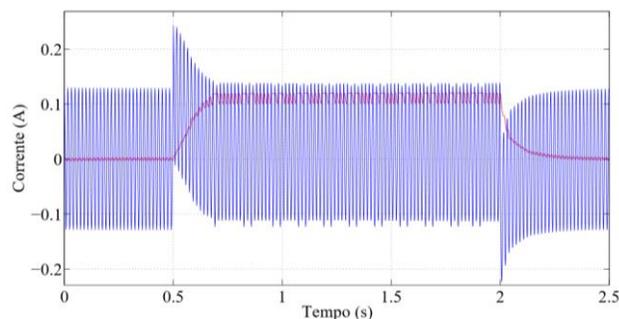


Fig. 8. Sinal de corrente secundária na carga do TC (azul) e corrente no ramo de magnetização (vermelho) para GIC de 50 A.

C. Caso 3 – GIC de 10A com frequência de 0,1 Hz

De forma diferente dos casos apresentados anteriormente, simulou-se uma GIC quase contínua com frequência de 0.1 Hz e com amplitude de 10 A. Embora a GIC tenha frequência, o comportamento do transformador é semelhante aos casos anteriores, como pode notado na Fig. 9 e Fig. 10. Como já era de se esperar o GIC causa a saturação do núcleo em poucos milissegundos, tem seu pico de 0.1507 A em 0.5158 s. O transformador também se apresentou saturado durante o intervalo inteiro de duração da GIC. Além disso, o sinal possui um decaimento com duração de 0.2155. Em seguida, a GIC é praticamente eliminada, circulando somente a componente de corrente alternada do sinal no secundário do TC.

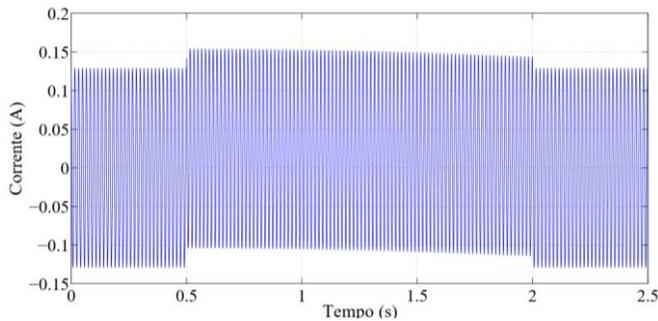


Fig. 9. Sinal de corrente secundária total para GIC de 10 A com frequência de 0,1Hz, tendo a duração de 1,5 segundos.

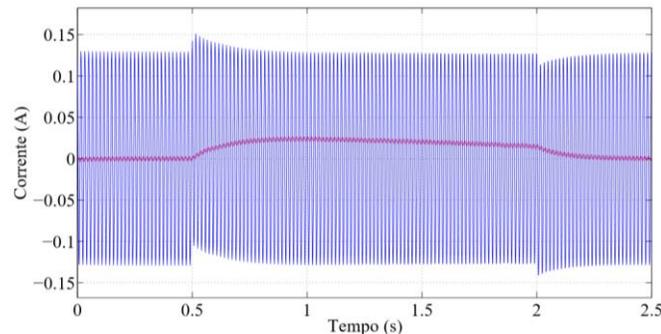


Fig. 10. Sinal de corrente secundária na carga do TC (azul) e corrente no ramo de magnetização (vermelho) para GIC de 10 A com frequência de 0,1 Hz.

Embora a GIC possua uma frequência de 0,1Hz, depois da saturação do TC a componente quase contínua circula todo ramo de magnetização do transformador, fazendo com que a carga associada ao circuito receba a GIC após a saturação do núcleo. Como pode ser visto na Fig. 10 o Transformador segue distorcendo a forma de onda repassada até o término da GIC, retornando a sua operação normal após 0,374s do fim da GIC.

D. Caso 4 – GIC de 40A com frequência de 0,5Hz

Essa simulação foi feita com uma GIC com frequência de 0,5 Hz e amplitude de 40A. Na Fig. 11, pode-se observar a saturação do TC decorrente da GIC circulando na LT. Nesse caso, a maior parte da componente gerada pela GIC circula no ramo de magnetização do TC. No entanto, diferentemente dos outros casos a forma de onda de corrente mantém-se distorcida durante todo o intervalo de tempo que a GIC permanece no sistema, conforme pode-se visualizar na Fig. 12. Além disso, a forma de onda segue distorcida mesmo após cessar o efeito da GIC, até que o fluxo remanescente seja eliminado do núcleo, retomando a operação normal após um tempo de 0,2s do fim da GIC.

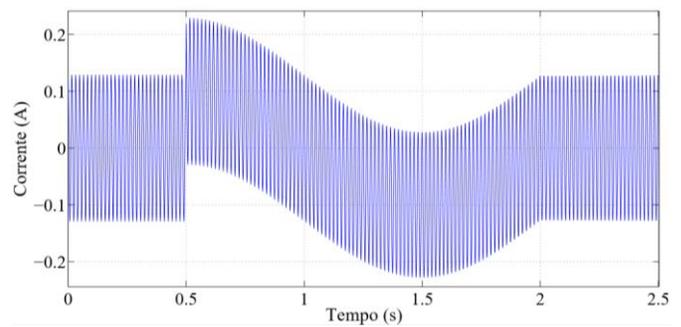


Fig. 11. Sinal de corrente secundária total para a GIC de 40 A com frequência de 0,5 Hz e duração de 1,5 segundos.

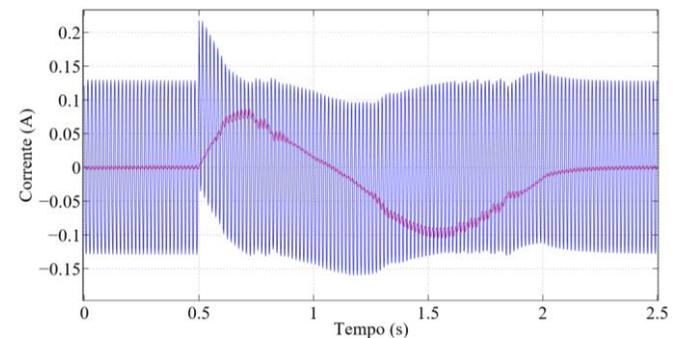


Fig. 12. Sinal de corrente secundária na carga do TC (azul) e corrente no ramo de magnetização (vermelho) para a GIC de 40 A com frequência de 0,5 e Hz.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante disso, conclui-se que as GICs comprometem a vida útil dos equipamentos do sistema elétrico de potência. O núcleo de um TC pode saturar se for exposto a uma GIC, dependendo da magnitude dessa corrente. Ficou claro nesse estudo que o núcleo do TC saturou mais rapidamente para frequências menores. Para trabalhos futuros pretende-se verificar o desempenho do relé de distância sob efeito de GICs.

REFERÊNCIAS

- [1] MOORE, S. K. Extreme Solar Storm Forecasters predict stormy space weather It was one of the fastest-traveling solar storms seen , and induced up. IEEE Spectrum, 2003.
- [2] PIJOLA, R. Geomagnetically induced currents during magnetic storms. IEEE Transactions on Plasma Science, v. 28, n. 6, p. 1867–1873, 2000. ISSN 00933813.
- [3] PINTO, L. M. et al. Um novo olhar sobre a segurança de sistemas elétricos. IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2008.
- [4] GIRGIS, R.; VEDANTE, K. Effects of gic on power transformers and power systems. CIGRE, 2012.