

DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA AUTOMATIZAÇÃO DO ENSAIO E DIAGNÓSTICO DE TRANSFORMADORES EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO

WENDELL DA CUNHA ALVES*, BENJAMIM RODRIGUES DE MENEZES†, LENIN MARTINS FERREIRA MORAIS†, PORFIRIO CABALEIRO CORTIZO†, WALMIR MATOS CAMINHAS†, WALLACE DO COUTO BOAVENTURA‡, PABLO SENNA OLIVEIRA§

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil

†Departamento de Engenharia Eletrônica - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - Minas Gerais, Brasil

‡Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - Minas Gerais, Brasil

§Companhia Energética de Minas Gerais - Belo Horizonte, MG, Brasil

Emails: wcunha@ufmg.br, brm@cpdee.ufmg.br, lenin@cpdee.ufmg.br,
porfirio@cpdee.ufmg.br, caminhas@cpdee.ufmg.br, wventura@cpdee.ufmg.br,
pablosen@cemig.com.br

Abstract— According to statistics, annually are performed in power distribution networks hundreds of reclosing of fuses to reset the service of transformers whose primary protection operated either by internal fault in equipment or events occurred on the network. In most cases the reset operation involves high risks for the electrician, it is not possible to identify, by visual inspection, the reason for the operation of the primary protection. The protocol most widely adopted to test the transformer is to replace the damaged fuse with a fuse of lower capacity and hence faster action. This procedure involves at least two serious risks: possibility of explosion of the transformer and / or fuse, which can lead to serious accidents. This work presents the development of an electronic equipment prototype, lightweight and compact enough in order to be used in field and to make a diagnosis of the operative condition of the transformer, without disconnection of the secondary side. Thus, the developed equipment will automate the testing procedure, making it safer, faster and more reliable. In this paper we will discuss the overview of the equipment, the main hardware components used, the implemented test algorithm and experimental results.

Keywords— Diagnosis, Transformers, Electronic equipment, Safety.

Resumo— Segundo as estatísticas de concessionárias de energia, anualmente são realizadas nas redes de distribuição de energia centenas de operações de religamento de chaves fusíveis para recolocação em serviço de transformadores cuja proteção primária operou, seja por defeito interno no equipamento ou por eventos ocorridos na rede. Na grande maioria dos casos a operação de religamento envolve elevados riscos para o técnico de manutenção pois não é possível identificar, apenas visualmente, o motivo da operação da proteção primária. O procedimento mais adotado para testar o transformador é substituir o fusível danificado por um de menor capacidade de corrente e, portanto, de atuação mais rápida. Este procedimento implica em pelo menos dois riscos graves: a possibilidade de explosão do transformador e/ou da chave fusível, o que pode levar a graves acidentes em campo. Assim, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo de equipamento eletrônico, leve e suficientemente compacto para poder ser utilizado em campo pelo técnico, e que realize o diagnóstico da condição operativa do transformador, sem sua desconexão da rede secundária. O equipamento desenvolvido irá automatizar o procedimento de teste, tornando-o mais seguro, mais rápido e confiável. Neste trabalho serão abordados a visão geral do equipamento, os principais componentes de hardware utilizados, o algoritmo de teste implementado e os resultados experimentais obtidos.

Palavras-chave— Diagnóstico, Transformadores, Equipamento Eletrônico, Segurança.

1 Introdução

Todo equipamento elétrico está sujeito ao desgaste, essa deterioração pode ser causada tanto por fenômenos ambientais quanto por envelhecimento. Tais desgastes, com o passar do tempo, podem dar origem à falhas. Os transformadores e linhas aéreas de distribuição são exemplos de equipamentos que podem sofrer com esse processo. Eles podem se danificar devido às variações de temperatura, tensão, vibrações e condições ambientais desfavoráveis como chuvas e tempestades que podem levar à quedas de árvores no sistema

elétrico ocasionando uma falha. Uma falha no sistema de distribuição provoca o desligamento do transformador associado, interrompendo o fornecimento de energia. O desligamento ocorre devido à operação da chave fusível que liga o primário do transformador à rede de 13,8 kV, normalmente causada por falhas no sistema elétrico.

As estatísticas das concessionárias de energia indicam que centenas de transformadores são trocados por ano devido à falhas (Filippo et al., 2009) (Souza, 2008). O problema é que, em sua grande maioria, as falhas somente são comprovadas quando ocorre um novo desligamento após a

tentativa de religar o transformador pela chave fusível. O protocolo atual em uso consiste, em antes de religar o sistema, percorrer a rede de baixa tensão alimentada pelo transformador em questão para verificar se existe algum material provocando um curto-circuito. Isso é realizado já que a proteção do sistema de distribuição pode operar em função de falhas ocorridas devido a problemas internos ou externos no transformador. Quando nada é encontrado, os técnicos de manutenção assumem que o problema pode ser no transformador ou foi um problema temporário que já desapareceu, como é o caso de um galho de árvore que encosta na linha durante um curto intervalo de tempo. Porém, a maior parte das falhas ocorridas nos transformadores não é visível externamente. Seguindo orientações do manual de campo, caso haja indícios de que o problema esteja no transformador, os técnicos devem instalar na chave fusível um outro fusível de menor capacidade de corrente e portanto, de atuação mais rápida, e fechar a chave.

Porém, esse procedimento apresenta dois riscos graves se o transformador estiver com falha. O primeiro deles é a possibilidade de explosão do transformador, podendo assim atingir os técnicos com óleo quente ou mesmo com alguma de suas partes. O segundo risco faz parte do próprio sistema de atuação do fusível, visto que, ao atuar, ele pode explodir e também atingir os técnicos com seus fragmentos.

Para sanar esse problema, foram estudados em (Dengming et al., 2000), (Wang et al., 2000) e (Bernieri et al., 1996) padrões e métodos de detecção de falhas em transformadores. Porém, esses métodos de modo geral são ineficientes ou muito demorados para a utilização em campo devido às seguintes razões: necessidade de desligamento dos terminais do secundário do transformador, necessidade da abertura do tanque do transformador e alto custo computacional.

Os métodos que necessitam realizar a análise com valores nominais de tensões, também não são viáveis, visto que o transformador, no momento do teste, estará desconectado da alta tensão pela chave fusível. Este fato traz a necessidade da geração de um sinal próprio para o teste.

Assim, foi proposto por (Souza, 2006) e por (Melo, 2010) um método simples que apresentou 100% de eficácia na identificação de falhas no transformador. O método é baseado na aplicação de sinais senoidais de 60 Hz de baixa amplitude no primário com o secundário em curto-circuito. São feitas medições das correntes do primário e do secundário, assim é determinado o estado do transformador basicamente através da especificação de sua relação de transformação.

O objetivo deste trabalho é descrever partes do desenvolvimento de um equipamento eletrônico que implementa a metodologia proposta

por (Melo, 2010) e patenteada sob número PI 0913254-6 A2 (Melo et al., 2012). O equipamento projetado é relativamente portátil e simples de ser operado em campo pelos técnicos de manutenção.

2 Visão geral do sistema

Por se tratar do desenvolvimento de um equipamento para ser utilizado por uma gama de profissionais, cujos níveis de capacitação vão de eletricitas a engenheiros de manutenção, optou-se por desenvolver todo o hardware de tal forma que atendesse a uma série de pré-requisitos; esses listados a partir de uma pesquisa realizada junto daqueles profissionais.

Deste modo, concluiu-se que o equipamento desenvolvido deve apresentar uma interface homem-máquina tão simples quanto possível para o operador, mas robusto o suficiente para suportar até mesmo erros cometidos durante sua utilização. Seguindo-se essas premissas, e a partir de uma criteriosa especificação dos dispositivos eletrônicos, foi desenvolvido um sistema hardware-software, que entre outras características, é capaz de:

- Facilitar e acelerar o diagnóstico de defeitos no transformador;
- Inibir a operação do equipamento mediante a detecção de sub ou sobretensão da fonte primária de alimentação;
- Se auto proteger através de circuitos de proteção contra sobretensões e sobrecorrentes, caso algum de seus blocos internos apresente algum tipo de falha;
- Sinalizar para o operador quando o teste está em análise ou é finalizado;
- O equipamento terá uma interface gráfica simples, ser de fácil instalação e utilização, reduzindo os custos com treinamento dos usuários.

A Figura 1 mostra o diagrama de blocos do hardware proposto. Nele estão retratadas as partes constituintes desde a alimentação em baixa tensão até o conector onde são ligados os cabos que aplicam as tensões no transformador sob teste. Buscou-se mostrar as interconexões que existem entre os blocos e o processador digital de sinais, que em última análise é a unidade essencial para o funcionamento de todo o hardware.

A seguir, as funções dos principais blocos da Figura 1 são descritas.

(a) *Baterias*: Para tornar o sistema mais portátil optou-se por utilizar alimentação a base de duas baterias de chumbo ácido (12V - 5Ah);

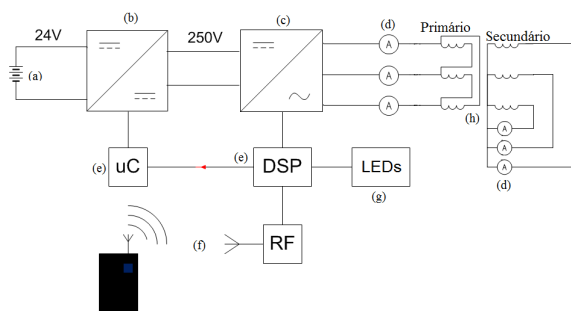


Figura 1: Diagrama esquemático do sistema

(b) *Conversor c.c.-c.c.*: Tem por função elevar a tensão fornecida pelas baterias e prover isolamento galvânica, alimentando o inversor em 250 V tensão contínua;

(c) *Inversor Trifásico Senoidal*: Deverá, a partir da tensão contínua, realizar uma conversão de energia para que seja possível alimentar o transformador com um conjunto de tensões trifásicas senoidais, o inversor deve ser capaz de variar o valor eficaz da saída entre 0 e 150 V (fase-fase) e deverá ter capacidade de corrente de 1 A;

(d) *Sensores*: São necessários para medir as grandezas elétricas no primário e no secundário do transformador;

(e) *Microcontrolador e Processador Digital de Sinais*: O microcontrolador tem como única função realizar o controle em malha fechada do conversor c.c.-c.c.. Já o inversor é controlado pelo DSP que também é responsável por ler as informações providas pelos sensores e executar o algoritmo de teste;

(f) *Receptor RF*: Para aumentar a segurança do ensaio optou-se por acionar o equipamento remotamente. Assim, foi adicionado ao projeto um receptor RF que a partir de um sinal enviado por um controle remoto gera um sinal de comando para inicializar o sistema;

(g) *Interface com o usuário - LEDs*: De forma a facilitar o uso do equipamento pelos técnicos de campo, foi colocado um painel de LEDs para informar o resultado final do teste e o estado atual do equipamento.

(h) *Transformador em teste*: Transformador da linha de distribuição cuja proteção operou e que deve ser ensaiado para fins de religamento da rede.

Nas próximas seções será descrito o desenvolvimento dos principais blocos que constituem o equipamento projetado: o conversor c.c.-c.c., o inversor e o algoritmo de diagnóstico implementado no DSP. Em seguida são apresentados os resultados obtidos com o equipamento.

3 Conversor c.c.-c.c.

Optou-se por utilizar neste conversor estático a topologia denominada “*Fed Current Push-Pull*” mostrado na Figura 2. Nesta topologia o conversor “*buck*” alimenta o conversor “*Push-Pull*” se comportando como uma fonte de corrente. Esta característica permite eliminar o problema da saturação do transformador pois a corrente no indutor L pode ser facilmente controlada usando técnicas de modulação por largura de pulso - PWM, que permite a possibilidade de implementação das malhas de controle através do microcontrolador.

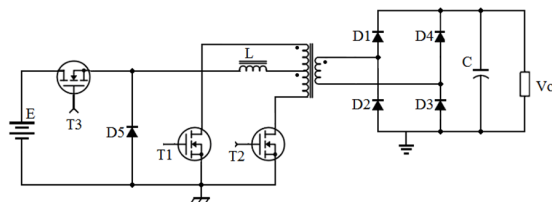


Figura 2: Diagrama do conversor *Current Fed Push-Pull*

O conversor pode operar em três modos de operação distintos dependendo dos sinais de comando dos transistores, os modos possíveis de operação são os modos *Buck*, *Boost* e *Buck-Boost*. Quando operando no modo *Boost*, o conversor não pode funcionar na ocorrência de um curto-circuito, a menos que a chave T3 seja mantida desligada até a remoção do curto-circuito. Já nos modos *Buck* e *Buck-Boost* o funcionamento na ocorrência de um curto-circuito é permitido se o controle implementado for em modo corrente. Portanto, neste projeto não será considerado o funcionamento no modo *Boost*.

Através de uma análise comparativa, pôde ser notado que quando operando no Modo *Buck* os valores das correntes no indutor, transformador e transistores são sempre menores do que aqueles que seriam necessários caso o conversor operasse no Modo *Buck/Boost*. Pelos motivos expostos acima, neste projeto, o conversor será dimensionado para operar no Modo *Buck*.

A estratégia de controle utilizada é o *Modo corrente média com malha externa de tensão*. Nesta metodologia a tensão de saída é controlada através de uma malha externa que fornece uma referência de corrente para a malha interna de controle de corrente conforme apresentado na Figura 3. Nesta abordagem a malha de controle interna é mais rápida que a malha de controle externa. Quando utiliza-se esta abordagem o conversor *Buck* que alimenta o *Push-Pull* se comporta como uma fonte de corrente ideal (Tang et al., 1993), assim basta controlarmos o valor da corrente média no indutor para que a tensão de saída seja controlada.

Os controladores utilizados são do tipo PI. Com controladores desse tipo podemos alcançar erro zero em regime permanente para um valor de referência constante, o efeito de perturbações de carga e pequenas variações paramétricas também são minimizadas com o uso desses controladores. Outra vantagem desta estratégia é a limitação da corrente máxima do indutor em 24 A provendo também uma proteção adicional ao sistema em caso de curto circuito. Na Tabela 1 é possível visualizar os valores dos ganhos dos controladores projetados. O controlador foi implementado digitalmente no microcontrolador TMS320F28027. A frequência de chaveamento é de 50 kHz na chave T_3 e de 25 kHz nas chaves T_1 e T_2 . A Tabela 2 sintetiza as especificações dos principais componentes utilizados no projeto deste conversor.

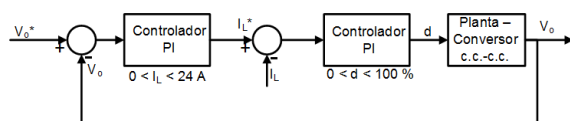


Figura 3: Estratégia de controle implementada

Tabela 1: Ganhos dos controladores PI projetados

Ganho	Valor
K_P malha de tensão	3
K_I malha de tensão	450
K_P malha de corrente	0,2
K_I malha de corrente	5000

Tabela 2: Especificações dos principais componentes do conversor "Fed Current Push Pull"

Componente	Especificação
T_1 e T_2	IRFP4668
T_3	IRF3205L
D_1 a D_4	C3DO6060A
D_5	MBR20100CT
L	40μH núcleo ferrite EE42/21/15 - 20 espiras
C	22μF Vishay 152RMH

4 Inversor trifásico senoidal

Em aplicações como fontes ininterruptas de energia (no-break), acionamentos de motores elétricos e geração de energia eólica, inversores trifásicos são largamente empregados para alimentar cargas trifásicas a partir de uma fonte de tensão contínua. O princípio de funcionamento de um inversor está explicado em (Mohan and Undeland, 2007).

Neste trabalho o inversor é utilizado para alimentar o transformador em teste com tensões trifásicas cujos valores eficazes de linha variam em rampa de 0 a 150 V. O diagrama do circuito projetado pode ser visto na Figura 4.

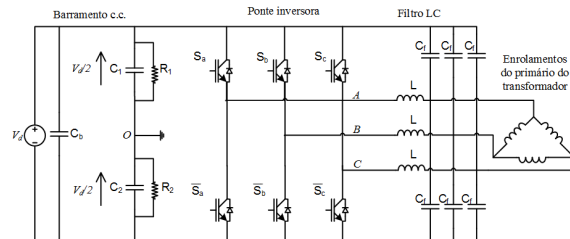


Figura 4: Inversor Trifásico Senoidal alimentando os enrolamentos do primário do transformador

Como as tensões nos pontos A, B e C da Figura 4 possuem formas de onda pulsadas, para minimizar os componentes de frequência elevada normalmente é utilizado um filtro passivo. A topologia de filtro mostrada foi escolhida por ser capaz de filtrar as componentes do espectro acima da frequência de chaveamento e por ser capaz de filtrar a tensão de modo comum gerada pelo inversor. As correntes de modo comum encontrarão caminhos de baixa impedância por C_1 ou por C_2 e chegarão ao ponto "O", que é fisicamente aterrado. Com a utilização do filtro, obtém-se na saída um conjunto de tensões trifásicas senoidais como é mostrado na Figura 5.

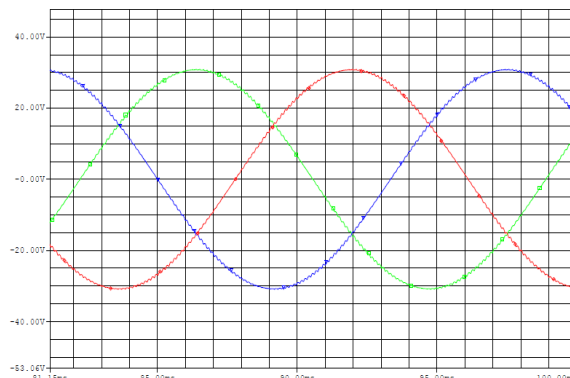


Figura 5: Tensões de linha na saída do filtro LC

Neste trabalho optou-se por utilizar um módulo de potência inteligente (Intelligent Power Module - IPM) baseado em seis IGBTs para implementar a ponte inversora. Os Intelligent Power Module combinam IGBTs de baixa perda, com alta frequência de chaveamento e integrado com os gate drivers otimizados e circuitos de proteção. A soma desses fatores resulta em um dispositivo com confiabilidade aumentada em relação aos módulos de potência convencionais. Para esse projeto foram avaliados diversos IPMs e a opção que se mostrou robusta e atrativa foi o CI FNB41060 da Fairchild Semiconductor. Para realizar o filtro LC foram utilizados indutores com núcleo de pó de ferro e capacitores de poliéster. A Tabela 3 sintetiza as especificações dos principais componentes utilizados no projeto do inversor.

Tabela 3: Especificações dos principais componentes do Inversor

Componente	Especificação
IGBTs	FNB41060
C_b	470 μ F EPCOS B43501
C_1 e C_2	330nF EPCOS B32674
C_f	2,2 μ F EPCOS B32674
R_1 e R_2	100k Ω / 2 W
L	3,9mH núcleo ferrite EE42/21/15 - 241 espiras

5 Algoritmo de diagnóstico

O algoritmo foi implementado em linguagem C no DSP TMS320F28335 da Texas Instruments utilizando o ambiente de desenvolvimento Code Composer Studio. Na Figura 6 é possível visualizar o algoritmo implementado em forma de fluxograma.

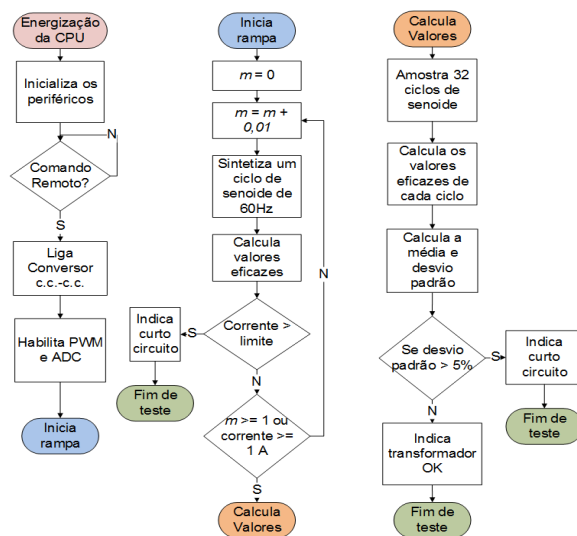


Figura 6: Algoritmo implementado no DSP TMS320F28335 em forma de fluxograma

Ao ser energizada, a CPU inicializa o sistema, a memória flash, o conversor AD e o módulo PWM. São utilizados três módulos PWM para a geração das tensões trifásicas, defasadas entre si de 120°. A frequência de chaveamento é de 15,36kHz, a cada ciclo de chaveamento é feito a atualização do ciclo de trabalho e o disparo da amostragem do conversor AD. Como o controle do inversor é feito em malha aberta, o valor do ciclo de trabalho é obtido a partir de uma tabela de seno, disponível na biblioteca do dispositivo, e do índice de modulação atual.

Após a inicialização, os módulos ADC e PWM são mantidos desabilitados. Quando o DSP recebe o sinal proveniente do controle remoto, ele imediatamente envia um sinal de ordem para ligar o conversor c.c.-c.c.. O inversor só é ligado três segundos após o recebimento do sinal do controle remoto, isso é feito para ter-se a certeza de que o conversor c.c.-c.c. atingiu regime permanente. Então o DSP habilita o ADC e o módulo PWM.

A tensão de saída é inicializada com índice de modulação, m , próximo de zero e é incrementado lentamente a cada ciclo de senoide de 60 Hz sintetizada, obtém-se assim uma rampa de tensão trifásica, isso é feito para que, em caso de curto circuito, as correntes não se elevem muito rapidamente. Foram implementadas três condições de parada da rampa: 1 - tensão de saída do inversor atingiu 150 V_{rms} , 2 - corrente de saída do inversor atingiu 1 A_{rms} ou 3 - o índice de modulação chegou a 1. A cada ciclo é verificado se alguma das correntes medidas ultrapassa os limites de curto circuito, caso isso aconteça o equipamento indica a condição de curto e finaliza o teste.

Ao final da rampa, a saída é mantida ligada e é realizada a amostragem durante 32 períodos da senoide de 60 Hz. Ao final da amostragem, os valores eficazes de cada período são calculados para cada uma das variáveis amostradas. É feita então uma média dos valores eficazes das grandezas medidas.

Em seguida, são calculadas nove relações de transformação entre os valores eficazes médios das três correntes do primário e das três correntes do secundário. A partir dessas nove relações de transformação são calculados uma média e um desvio padrão. O fato de calcular a média e o desvio padrão das relações de transformação universaliza o teste, possibilitando o ensaio de transformadores com diferentes relações de transformação. Caso haja um desequilíbrio de correntes devido à problemas no transformador o desvio padrão será fortemente alterado.

Finalmente, é feito o diagnóstico do transformador. Se o desvio padrão das relações de transformação for maior que 5%, significa que existe um problema interno nos enrolamentos do transformador. O valor de 5% foi determinado para levar em consideração as incertezas das medições realizadas. Foi verificado experimentalmente que, em caso de algum problema no transformador, o valor do desvio padrão será bem maior, acima de 30%. Detectado um problema, um LED de indicação deverá ser aceso.

Se, após o teste realizado acima, não for detectado nenhum problema, significa simplesmente que o transformador está funcionando perfeitamente. Um LED verde deverá então ser aceso para indicar que o transformador está em perfeito funcionamento e que pode ser religado.

6 Resultados experimentais

O conversor c.c.-c.c. e o inversor foram testados em conjunto, a Figura 7 mostra a tensão do barramento c.c. e a tensão de linha V_{ab} durante a sequência de teste do equipamento. É possível visualizar a energização suave do barramento, em seguida é iniciada a rampa da tensão alternada na saída do inversor. Ao alcançar o valor limite de

tensão a rampa é interrompida e é feito o diagnóstico do transformador. Ao final do diagnóstico o inversor é desligado e, em seguida, o conversor c.c.-c.c., nota-se que o algoritmo de teste descrito anteriormente é executado em menos de 20 segundos. Na Figura 8 pode-se observar as tensões trifásicas de saída ao fim da rampa, neste ensaio a amplitude da tensão foi limitada em 110 V.

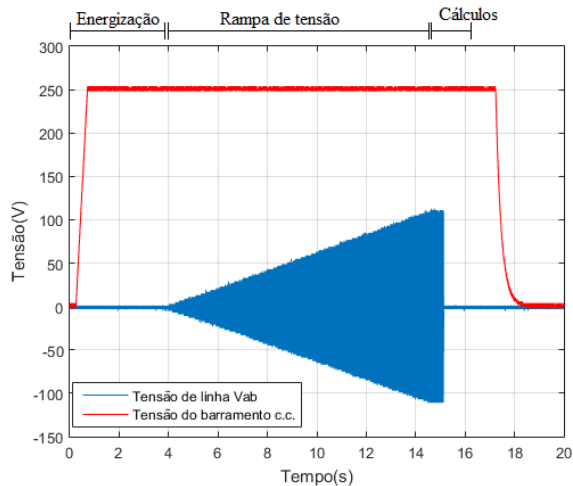


Figura 7: Tensão do barramento c.c. e Tensão de linha V_{ab} durante a execução do algoritmo de teste

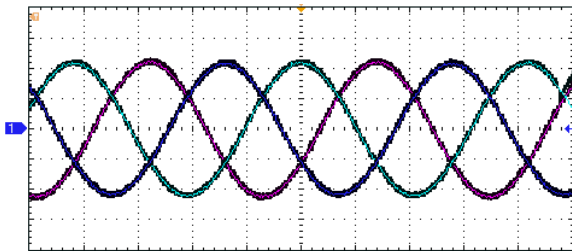


Figura 8: Tensões na saída do inversor quando o limite da rampa é atingido (50 V/div - 4 ms/div)

Após a validação do funcionamento dos conversores estáticos, suas placas eletrônicas foram dispostas dentro de uma caixa metálica. Foram realizados ensaios em diversos transformadores.

Primeiramente, foi testado em laboratório um transformador de 3,5 kVA 220 V Δ -11 V Y, como mostra a Figura 9. O equipamento foi capaz de detectar a boa condição operativa do transformador em questão. Em momentos distintos, os terminais de primário e secundário do transformador foram curto-circuitados e realizou-se o teste repetidamente. Conseguiu-se identificar com 100 % de eficácia os curto-circuitos realizados.

Em seguida, o protótipo foi levado para testes em campo. Foi testado o transformador de 112,5 kVA 13,8 kV - 220/127 V em bom estado mostrado na Figura 10, o protótipo identificou com sucesso a condição do transformador. Posteriormente, foi ensaiado o transformador de poste



Figura 9: Foto de ensaio realizado no laboratório com transformador de 3,5 kVA 220 V - 11 V



Figura 10: Foto de ensaio realizado em campo com transformador de 112,5 kVA 13,8 kV - 220/127 V em perfeito estado de funcionamento



Figura 11: Foto de ensaio realizado em campo com transformador com falha de isolamento cuja potência nominal é de 75 kVA e tensão de 13,8 kV - 220/127 V

mostrado Figura 11 cuja potência nominal é de 75 kVA e tensão de 13,8 kV - 220/127 V. Neste ensaio o transformador apresentava curto-circuito nos enrolamentos causado por uma falha de isolamento, condição que foi corretamente identificada pelo equipamento projetado.

Após repetidos ensaios, o equipamento foi capaz de identificar transformadores em perfeito estado de funcionamento e de detectar as faltas listadas abaixo:

- Curto-circuito no primário ou no secundário;
- Curto-circuito nas bobinas devido à falha de isolamento.

7 Conclusões

Neste texto foi descrito uma visão geral do equipamento proposto para teste de transformadores de redes de distribuição. Foram abordados aspectos construtivos de seus principais blocos constituintes e do software implementado no DSP.

O equipamento foi testado exaustivamente e apresentou resultados muito satisfatórios. Houve também o recebimento de *feedback* positivo por parte dos profissionais da CEMIG.

É importante frisar que a automatização deste processo de teste representa uma enorme economia de tempo e de custos para a concessionária de energia. Um processo, antes, demorado e perigoso para os trabalhadores agora pode ser feito de forma rápida e segura. Os consumidores também são beneficiados, pois, em caso de defeitos, o fornecimento de energia será restabelecido em curto prazo de tempo.

No presente momento o projeto se encontra em fase final com dois protótipos produzidos. Nos próximos meses serão produzidas diversas unidades para utilização em campo. O desenvolvimento deste equipamento gerou a patente de número PI 0913254-6 A2.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES - Brasil e da CEMIG D.

Referências

- Bernieri, A., Betta, G. and Liguori, C. (1996). On-line fault detection and diagnosis obtained by implementing neural algorithms on a digital signal processor, *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* **45**(5): 894–899.
- Dengming, X., Honglei, L. and Xuguang, L. (2000). New apparatus for detecting transformer faults online, *Properties and Applications of Dielectric Materials, 2000. Proceedings of the 6th International Conference on*, Vol. 1, IEEE, pp. 310–313.
- Filippo, G., Ávila, J. I. and Queiroz, L. G. (2009). Análise de falhas de transformadores em redes aéreas de distribuição, *V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (V CITENEL)*, ANEEL.
- Melo, I. F., Couto, E. C., Caminhas, W. M., Boaventura, W. C., Cortizo, P. C. and Borba, D. L. S. (2012). Dispositivo para diagnóstico de falhas em transformadores de distribuição e método. Patente PI 0913254-6 A2.
- Melo, I. F. D. (2010). *Desenvolvimento e Implementação de um Sistema Dedicado para Diagnóstico de Falhas em Transformadores de Distribuição*, Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG.
- Mohan, N. and Undeland, T. M. (2007). *Power electronics: converters, applications, and design*, John Wiley & Sons.
- Souza, D. C. P. (2008). *Falhas e defeitos ocorridos em transformadores de potência do sistema elétrico da Celg, nos últimos 28 anos: um estudo de caso*, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) Escola de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- Souza, L. M. D. (2006). *Método de detecção de falhas em transformadores de distribuição de poste com proteção operada*, Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG.
- Tang, W., Lee, F. C. and Ridley, R. B. (1993). Small-signal modeling of average current-mode control, *Power Electronics, IEEE Transactions on* **8**(2): 112–119.
- Wang, Z., Liu, Y. and Griffin, P. J. (2000). Artificial intelligence in oil fault diagnosis using dissolved gas-in-oil information, *Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE*, Vol. 4, IEEE, pp. 2422–2427.