



CONSTRUÇÃO DE UMA FONTE CHAVEADA DE POTÊNCIA USANDO PWM, COM CIRCUITO DE COMUTAÇÃO E REVERSÃO DE CORRENTE PARA APLICAÇÃO EM PROSPECÇÃO MINERAL.

Hiodo*, F.Y., Silva, N., Blaine, K., Silva, J.E., Galhardo L.F. - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas IAG. Universidade de São Paulo.

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction, or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

1 - Abstract

A compact switching converter was developed, working at 30 kHz, in pulse width modulation PWM. An HEXFET N channel transistor excites a transformer with ferrite core, in flyback mode. Although great yield reached, about 90%, it didn't require great size radiator. For vertical electric sounding with long aperture, two PWM sources stabilized in voltage are coupled in series, to reach 800 VDC, in steps of 200 V. As the switching source can reach duty cycle about 90%, output maybe changed widely, adjusting the feedback of PWM circuit with FET analogic switches. Then it avoids use of commutation mechanic switch and great isolation. Due to this wide range of output voltage, stabilizing reached by feedback is good (better than 5 %).

Through current transformer in the PWM feedback link, converter can work in stabilized current mode. If coupled in series with classical DC sources using handle adjust, it decreases current ripple caused by electrical resistance change of soil.

A switching and reverse current circuit with 4 HEXFET transistors in bridge coupled was made and connected to source output. If it is applied into soil, decreases polarization effect of voltage electrode, and allow induced polarization measurement in time domain.

When a short circuit occurs at output or the current in the source of HEXFET transistor reaches a limit value PWM system turn off, avoiding damages.

2- Introdução

O emprego de técnicas geoeletricas para prospecção mineral é o mais difundido atualmente devido ao seu baixo custo e grande eficiência na delimitação de contrastes elétricos em subsuperfície.

A grande maioria dos equipamento geoeletricos operam no modo DC, e usam conversores tipo push-pull, de baixo rendimento. Estes dispositivos utilizam pesados transformadores e, transistores de alta potência (encapsulamento TO5) acoplados a volumosos radiadores de Al anodizado. Devido ao alto consumo de corrente, necessitam de baterias automotivas de capacidade 55Ah. Portanto, a portabilidade destes

equipamentos DC fica comprometida dificultando os trabalhos de campo.

Nestes equipamentos, a corrente de saída é ajustada manualmente através de reostatos ou auto-transformadores variáveis. Logo é necessário a presença de um operador atuando continuamente sobre o dispositivo de controle, que introduz erros de medida de campo.

Atualmente, o uso de fontes de corrente estabilizada, dotadas de circuitos de chaveamento e reversão, permite reduzir o consumo das baterias, e agiliza as medidas de potencial pois minimiza os efeitos de polarização dos eletrodos metálicos.

3 - Objetivos

Diante do problema exposto, partiu-se para o desenvolvimento de um equipamento leve, compacto e de elevado rendimento de conversão.

Inicialmente foi feito um extenso levantamento bibliográfico de artigos técnicos sobre fontes DC-DC e, das características dos componentes eletrônicos e de núcleos de ferrite existentes no mercado nacional.

Na fonte projetada, adotou-se o conceito de conversores chaveados de alta eficiência, usados normalmente em equipamentos geoeletricos importados, que foram extensamente pesquisados. Fontes de microcomputadores, carregadores de bateria, no-breaks, etc., que necessitam de correntes elevadas com baixas perdas utilizam este mesmo princípio (Mello, 1990).

Foi desenvolvido uma unidade de fonte chaveada de tensão ou corrente estabilizadas, usando circuito de modulação por largura de pulsos PWM, ajustado em 30 kHz. O modo de chaveamento escolhido foi o flyback, freqüentemente adotado em circuitos de conversão de baixa para alta tensão, de alto rendimento. Devido à realimentação adotada através de enrolamento secundário auxiliar ou de transformador de corrente ligado na saída da fonte é alcançado um alto grau de isolamento elétrica, que evita possíveis fugas de corrente. Isto, também, elimina o risco de choques elétricos na carcaça do equipamento durante sua operação em campo.

Para se minimizar o efeito de polarização eletroquímica dos eletrodos de potencial, foi projetado um circuito de comutação e reversão de corrente injetada no solo, usando-se modernos transistores MOS HEXFET de potência, de valores de tensão dreno-fonte V_{DS} da ordem de 1000 Volts.

4 - Descrição da fonte chaveada

Esta fonte PWM de rendimento da ordem de 90% baseia-se no popular circuito integrado (CI) SG 3524. O CI controla o chaveamento da corrente de um transistor HEXFET IRFZ46N, polarizado no modo flyback (Fig.1). Este modo de saída de conversão para alta tensão, garante elevado rendimento em alta freqüência (≈ 100 kHz).

Nos manuais técnicos disponíveis do SG3524, o controle de potência é feito através de transistores bipolares com encapsulamentos TO5 de baixa resistência térmica de junção, com radiadores de Al. Nesta fonte foram feitas algumas mudanças no circuito original para que pudesse ser usado um transistor HEXFET canal N, de baixíssima resistência dreno-fonte $R_{DS} (\approx 0,010\Omega)$ Além de seu baixo custo, permite comutar valores elevados de corrente de dreno $I_D (\approx 50 A)$ com baixas perdas.

Avaliando-se equipamentos geofísicos modernos existentes, fixou-se a freqüência do PWM em 30 kHz, que é inaudível e está na faixa de alto rendimento do

transformador com núcleo de ferrite THORNTON IP6 formato EE, disponível no mercado.

Foram testados 4 núcleos de ferrite tipo EE, de diferentes procedências, para confecção do transformador de potência T1 (Fig.1) usado na fonte. O núcleo cerâmico de especificação IP6, apresentou melhor desempenho no arranjo flyback adotado, pois não ocorria oscilações espúrias amortecidas, na conexão do enrolamento primário do transformador T1 com o dreno do HEXFET de potência (Fig.1), durante o semiciclo de abertura deste dispositivo de comutação.

Para a confecção dos enrolamentos primário (10 esp.) e secundário (200 esp.) do transformador de potência T1 (Fig.1), foi usada a técnica descrita em Pomilio (2002) que maximiza o acoplamento magnético entre os 2 enrolamentos e aumenta seu rendimento.

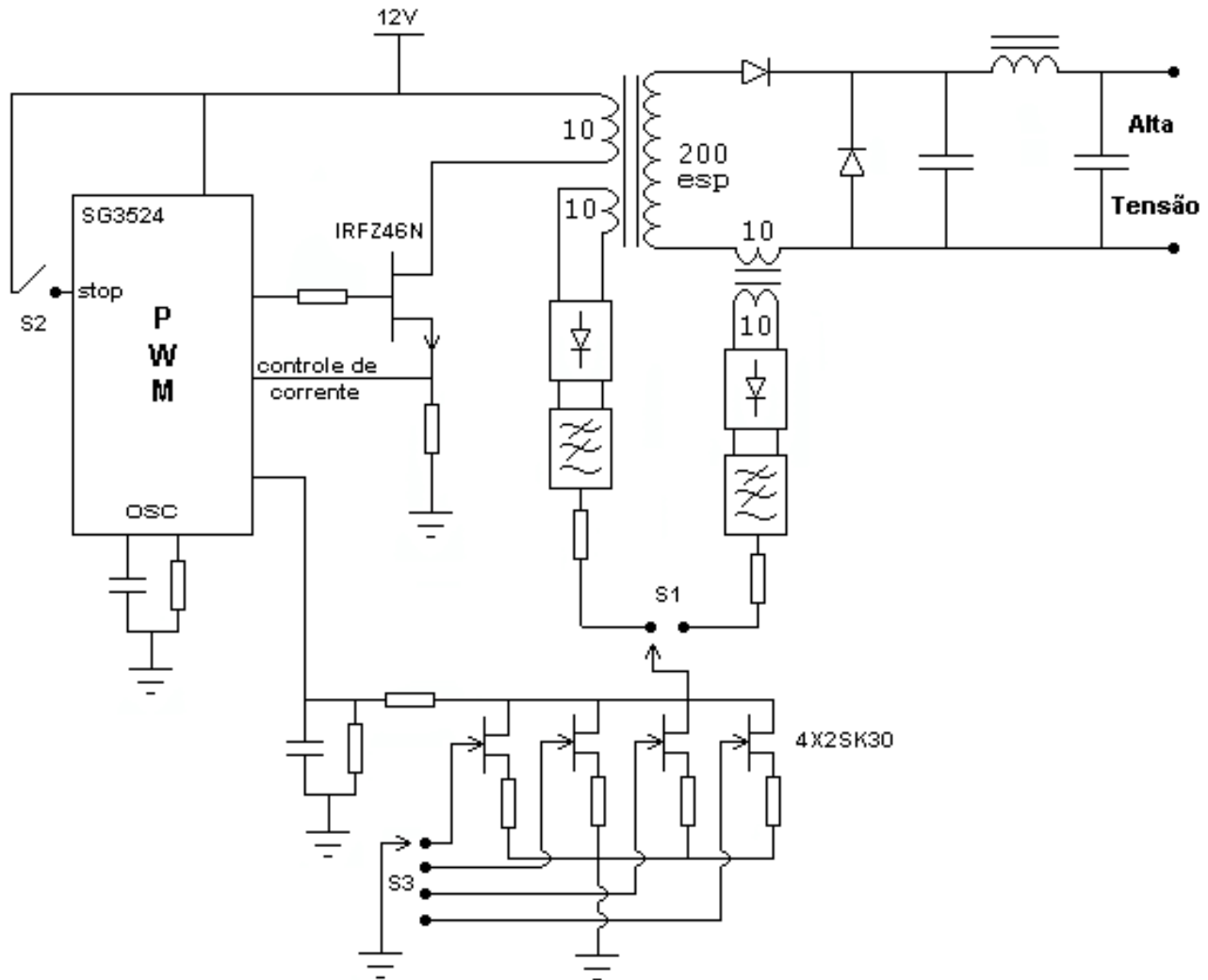


Fig.1. Circuito da fonte chaveada estabilizada no modo de tensão ou de corrente

5 - Descrição do modo de estabilização em tensão

Através da chave S1 (Fig.1) seleciona-se entre os modos de estabilização em tensão, ou corrente. Esta chave apenas seleciona qual a fonte da tensão de amostragem

para a realimentação do sistema. Estas tensões de amostragem são sinais de 30kHz que sofrem retificações e filtragens adequados antes de serem aplicados à S1. No caso da estabilização em tensão a amostragem de realimentação é tomada de um 2º enrolamento secundário (auxiliar) de 10 espiras do transformador de potência, para a isolação elétrica total.

Os diferentes valores fixos (50, 100, 200, ou 400 Volts) de tensão estabilizada na saída são obtidos pela comutação de S3, a qual ativa as chaves analógicas, formadas pelos transistores FET 2SK30, de cada um dos atenuadores de tensão. Finalmente a tensão de realimentação do atenuador selecionado é aplicada no amplificador de erro interno ao CI SG3524. Este intervalo amplo de variação de tensão na saída da fonte, sem o recurso de derivações auxiliares do enrolamento secundário, é alcançado devido ao alto ciclo de trabalho do circuito PWM. Este artifício evita a uso de grandes chaves seletoras rotativas de alta isolação na saída da fonte. Este sistema de chaves analógicas possibilita a escolha de tensão de saída estabilizada por controle de algum dispositivo digital remoto (via software).

No caso de sondagens elétricas verticais no arranjo Schlumberger, de grandes aberturas, duas fontes chaveadas de tensão controlada podem ser ligadas em série para que um valor mínimo de corrente possa ser injetado no solo, e uma tensão possa ser mensurada nos eletrodos de potencial.

6 - Descrição do modo de estabilização em corrente

No modo de estabilização em corrente constante (10, 20, 50 e 120mA) é usado um transformador de corrente conectado na saída do transformador de saída (Fig.1). Este transformador de amostragem foi construído com núcleo toroidal THORNTON (diâmetro: 15mm) com 10 espiras nos enrolamentos primário e secundário. Isto garante total isolação entre os estágios de baixa e alta tensão. A tensão de amostragem deste transformador é retificada e filtrada. Quando a chave S1 é comutada para o modo de corrente estabilizada, a tensão originada no transformador de corrente é então aplicada na entrada do amplificador de erro do CI SG3524, semelhante ao processo de estabilização em tensão.

A corrente aplicada ao solo pode ser mensurada indiretamente, acoplado-se um voltímetro digital no modo RMS para medida de tensão de realimentação (chave S1).

Uma outra vantagem do uso do CI SG3524 é que seu oscilador interno pode ser inibido pela aplicação de tensão numa de suas entradas, via interruptor de pressão S2 (Fig.1). Isto bloqueia todo o estágio de potência da fonte, e evita possíveis acidentes de campo. Também este CI PWM possui um circuito interno proteção, que na ocorrência de curto-circuito, ou corrente acima do limiar máximo na saída desativa a sinal de excitação da parte de potência.

7 - Descrição do circuito de comutação e reversão.

Na saída da fonte chaveada em modo de tensão, é ligado um circuito de comutação e reversão de corrente usando transistores HEXFET e fotoacopladores. Estes transistores de comutação estão ligados em ponte,

protegidos de curto circuito, pelo circuito PWM, que limita a corrente máxima. A aplicação de corrente no solo pode ser controlada pela polarização de um dos terminais do CI PWM, via interruptor de pressão, como descrito anteriormente.

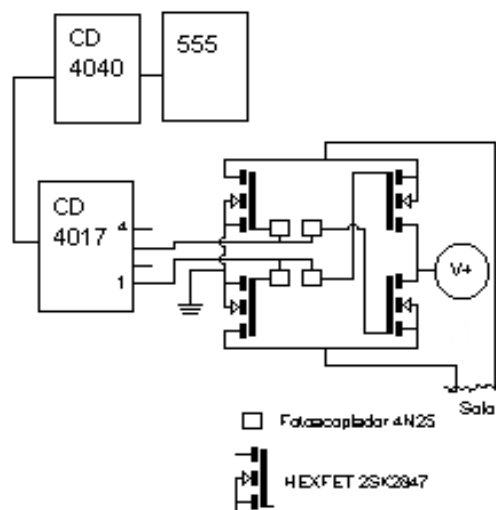


Fig.2- Circuito de comutação e de reversão de corrente.

A operação de reversão de corrente aplicado no solo, é controlada por um circuito em ponte composto de 4 transistores HEXFET 2SK2847, com tensão reversa dreno-fonte V_{DS} de 900 V e corrente de dreno máximo I_D de 12 A (Fig.2). Estes componentes estão fixados em placa de fibra de vidro que asseguram a isolação desejada. Para polarização dos 4 fotoacopladores 4N25 de disparos dos HEXFET e dos circuitos digitais de geração do sinal foi construída uma fonte chaveada de baixa potência tipo inversor, que garante alta isolação elétrica. Em caso de curto circuito na saída, o próprio PWM SG3524 atua, limitando a corrente no sistema de comutação em ponte. Este modo de comutação através de chaves analógicas (transistores HEXFET) evita a ocorrência de oscilações comumente presentes em dispositivos que usam indutores e retificadores controlados de silício (SCR).

A geração dos pulsos é feita por um circuito oscilador 555 ligado a uma cadeia de divisores binários de frequência (CD4040). A seqüência de chaveamento para a reversão de corrente aplicada ao solo é comandada por um circuito contador em anel CD4017 (Fig.2). Entre as fases de condução direta e reversa, de um ciclo completo, as saídas usadas do contador em anel são comutadas para o terra (fase de descanso, Fig.3). Estas tensões são aplicadas nas portas digitais de potência do CD4050B (buffer), que isolam as saídas do CD4017, dos fotoacopladores 4N25. Estes componentes ópticos de alta isolação (2500 V) disparam os HEXFET da ponte.

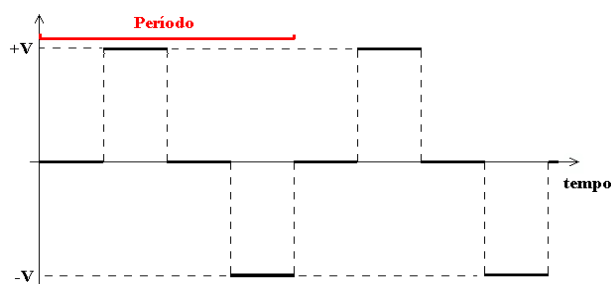


Fig.3. Ciclo de completo do circuito reversor.

Esta base de tempo formada pelos CI 555, 4040, 4017 & 4050B permite que o circuito de chaveamento funcione desde 0 até 10 Hz, com precisão da ordem de 0,1%.

8 - Resultados e Conclusões

As fontes chaveadas usando circuitos integrados (CI) de modulação por largura de pulsos (PWM) apresentam rendimento da ordem de 90%, e podem substituir com grande vantagem, os conversores que operam no modo push-pull. Estes conversores tradicionais empregam transistores de potência de encapsulamentos metálicos pesados TO5 acoplados também a grandes radiadores de Al. Estes componentes eletrônicos de grande capacidade térmica têm de dissipar a potência não consumida pela carga (solo). Esta perda não ocorre nas fontes chaveadas, pois a maior parte da potência solicitada é transferida ao transformador de potência, evitando, portanto, sua dissipação sob a forma de calor.

Quando ajustados para operação no modo de tensão constante, numa sondagem elétrica vertical de campo, duas fontes PWM são acopladas em série, para ter-se uma tensão de saída de 800 VDC e uma potência máxima de 200 W.

As vantagens desta fonte chaveada que pode operar no modo de tensão ou corrente estabilizada são:

- 1) Ausência de ruído audível da fonte, devido a faixa de operação do circuito PWM SG3524. Alguns sinais espúrios de alta frequência (superior a 500 kHz) estão presentes, mas não afetam a performance do conversor.
- 2) Proteção contra acidentes de campo, pois a fonte chaveada só será ativada quando um interruptor de pressão (S2) for acionado pelo operador.
- 3) Uso de núcleos de ferrite pequenos tipo EE (THORNTON IP6), pesando cerca de 200 g, facilmente encontrados no mercado nacional.
- 4) Utilização de capacitores de filtro (poliéster), de baixos valores, devido a frequência de operação de 30 kHz.
- 5) Fácil confecção dos enrolamentos secundário (≈ 200 espiras) e primário (≈ 10 espiras).
- 6) Uso de pequenos radiadores de Al, acoplados aos transistores HEXFET. Devido a pequena resistência dreno-fonte R_{DS} ($\approx 0,01\Omega$) durante a condução destes componentes discretos de alta velocidade de comutação, é possível atingir rendimento elevado, obtendo correntes de dreno I_D elevadas.
- 7) Isolação elétrica total do elo de realimentação nos modos de tensão ou de corrente constantes.

8) Boa estabilização de tensão de saída, da ordem de 5%.

9) Ausência da chave seletora rotativa de alta isolamento elétrica (nylon ou teflon), para comutação das tensões de saída, que pode atingir 1000 VDC.

10) Economia de energia, pois a corrente não necessária é comutada, não sendo dissipada sob a forma de calor. Logo maior autonomia em campo.

As características descritas tornaram a fonte muito compacta e leve, dispensando o uso de ventiladores *coolers* e facilitando a isolamento elétrica dos estágios de alta e baixa tensão. O equipamento desenvolvido permite usar recursos de servocontroles que introduzem uma boa estabilização na tensão de saída. O modo de realimentação desenvolvido garante um isolamento ótimo da alta tensão de saída com a bateria, dando maior segurança ao operador de campo.

A fonte chaveada quando estabilizada em corrente permite a repotencialização de equipamentos antigos que operam no modo de tensão contínua. O teste foi feito com sucesso, usando-se um conversor TDC1000-12. A fonte chaveada desenvolvida foi conectada em série com a fonte DC, para compensar eventuais oscilações de corrente do equipamento. As variações de resistência elétrica do contato eletrodo-solo, durante a aplicação de corrente, são compensadas pela fonte PWM, que garante uma flutuação de corrente da ordem de 5%.

Além do alto rendimento da fonte chaveada, o circuito de chaveamento e reversão proporciona economia de energia pois entre cada etapa de condução (direta e reversa) de um ciclo completo de corrente, tem-se intervalos de tempo de igual duração, onde a corrente é zero. Isto evita que diferentes valores de tempos de recuperação dos 4 HEXFET 2SK2847 da ponte possam interferir no rendimento do circuito de saída. Esta seqüência de aplicação de corrente no solo, possibilita o uso do equipamento em medidas de polarização induzida no domínio do tempo, para o mapeamento de argolas ou sulfetos, dependendo das características do receptor.

A polarização eletroquímica resultante do contato dos eletrodos de aço inox com o solo, para medida de potencial, é minimizada pelo circuito de reversão de corrente injetada no solo. Este modo de aplicação de corrente, dispensa o uso de eletrodos não polarizáveis de $CuSO_4$, para medidas de potencial induzido no solo.

Para reduzir os efeitos de polarização eletroquímica dos eletrodos, foi desenvolvido um circuito de chaveamento e reversão da corrente de saída da fonte chaveada descrita inicialmente.

9 – Bibliografia

- 1- Pomilio, J.A., 2000- Fontes chaveadas. Curso de Pós-Graduação UNICAMP.
- 2- Mello, L.F.P., 1990. Projeto de Fontes Chaveadas. Ed. Érica, 291pp.
- 3- Motorola, 1976. Semiconductor Data Library, Vol. 5.