ESTRATÉGIAS DE MEDIÇÃO DA TENSÃO VCE EM MÓDULOS DE POTÊNCIA DE CONVERSORES TOLERANTES A FALHAS BASEADOS EM IGBT.

BRUNO DE C. FARIA[1], ANDERSON V. ROCHA[2], ALYSSON A. P. MACHADO[1], VICTOR N. FERREIRA[1], BRAZ J. CARDOSO FILHO[1]

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

[2]*Dept. of Electrical Engineering*
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG
Belo Horizonte, Brazil
Email: brunocoltec@gmail.com

Abstract— Current researches reveals an important interest in reliability and availability of electronic devices and equipments for critical applications. Particularly, due to its importance in the service continuity of vital processes, fault-tolerant electronic converters have highlighted. This work proposes the realization of the IGBT-based ANPC fault-tolerant converter (FT-ANPC), proposed in recent works, as well as degradation monitoring of the converters power modules from the collector-emitter voltage (VCE) measurement.

Keywords— Reliability, Power Converters, Condition Monitoring, Power Electronic, Fault Tolerant Converter.

Resumo— Pesquisas atuais apontam para um importante crescimento no interesse pela confiabilidade e disponibilidade de componentes e equipamentos eletrônicos. A tolerância contra falhas em conversores eletrônicos tem merecido especial atenção pela importância desses equipamentos em aplicações críticas. Este trabalho propõe a realização de um conversor ANPC, baseado em IGBT e tolerante a falhas (FT-ANPC), proposto em trabalhos recentes, bem como o monitoramento da degradação dos módulos de potência do conversor a partir da medição da tensão coletor-emissor (VCE).

Palavras-chave— Confiabilidade, Conversores de potência, Monitoramento de condição, Eletrônica de Potência, Fault Tolerant Converter.

1 Introdução

O tema da Confiabilidade em eletrônica de potência ganhou um espaço de destaque nas pesquisas da área. Isso ocorreu devido a inserção dos conversores em ambientes críticos, onde a falha desses equipamentos leva a prejuízos exorbitantes ou coloca em risco vidas humanas. Exemplos como plantas de geração offshore, plataformas de extração de petróleo, automóveis, linhas de laminação, dentre outros podem ser citados.

A Figura 1 mostra os percentuais de causas de falhas em conversores eletrônicos que levam o equipamento à indisponibilidade (Yang, 2010). Nota-se que as falhas nos semicondutores de potência são a terceira maior razão para a descontinuidade de serviço, representando 21% do total de falhas observadas (Yang, 2010). Este trabalho foca nas falhas observadas nos dispositivos semicondutores de potência e estuda aspectos relacionados com o monitoramento da degradação desses componentes do conversor.

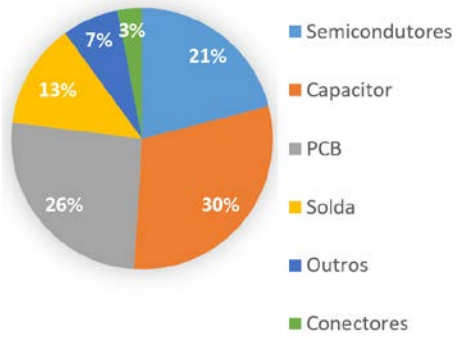


Figura 1- Distribuição das origens de falhas em conversores eletrônicos.

Em 1974, Willian E. foi responsável em determinar o escopo da eletrônica de potência na área da Engenharia Elétrica; quatro décadas depois, em (Wang, 2013), foi proposto o escopo da confiabilidade na eletrônica de potência ilustrado no diagrama da figura 2. O gráfico apresenta os três principais pontos que devem ser observados para melhorar a confiabilidade do sistema, o Controle, o Projeto para a Confiabilidade e o Monitoramento e verificação.

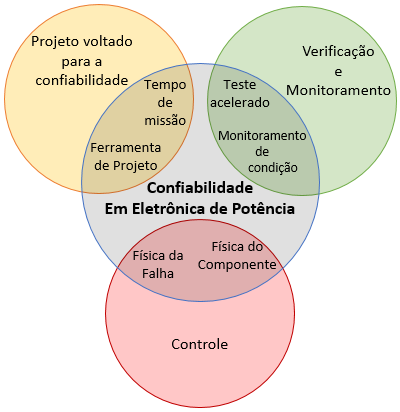


Figura 2 - Escopo da Confiabilidade na Eletrônica de Potência

Com capacidades de bloqueio de tensão que chegam a 6500 V ou correntes de até 2400A, os módulos de potência de IGBT são amplamente empregados na construção de conversores. Apesar da maturidade já adquirida nos processos de fabricação, falhas nesses componentes não são incomuns, principalmente na presença de fatores de estresse encontrados na maioria dos ambientes industriais. Modos de falha observados em módulos de IGBTs são ilustrados no diagrama da Figura3.

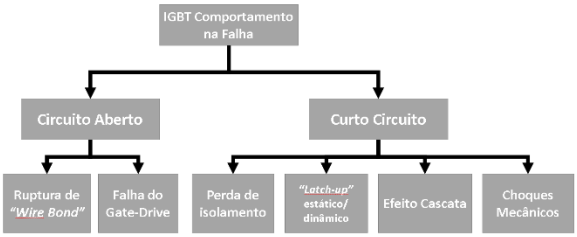


Figura 3 - Diagrama de Falhas do IGBT

Diferentemente dos dispositivos "*press-pack*", que falham sempre em curto circuito, módulos de potência de IGBT (flat-pack) podem falhar em dois modos distintos: em circuito aberto ou em curto-circuito. Muitas vezes uma falha se inicia em circuito aberto e evolui para uma falha em curto-circuito, não sendo possível, a priori, definir previamente o modo de falha do componente. A física da falha dos módulos de potência de IGBT pode ser melhor compreendida a partir da estrutura do componente, ilustrada na figura 4.

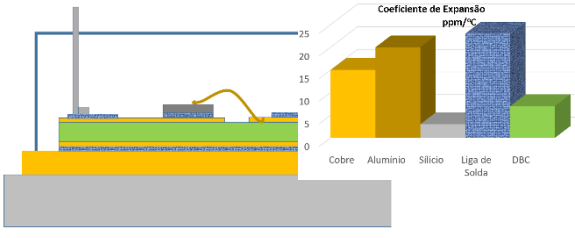


Figura 4 - Estrutura Interna módulo de potência de IGBT

Em [4] foi relatado que um dos principais dispositivos de falha é a ruptura de fios de ligação, ou "wire bonds". Esse tipo de falha é devido à diferença dos coeficientes de expansão térmica dos materiais que integram o módulo de potência. O mecanismo de falha é baseado no ciclo térmico que o dispositivo é submetido devido à constante variação de carga conectada ao conversor, desencadeando um estresse termomecânico. Esse tipo de estresse será repetido inúmeras vezes durante a vida do dispositivo, levando a fissuras microscópicas nas soldas e fragilizando a conexão. Com o passar do tempo a degradação leva a uma falha em circuito aberto naquela solda. Com a falha de um dos "*wire bonds*" os outros serão sobrecarregados devido ao aumento da carga, desencadeando em um efeito avalanche e falha do dispositivo.

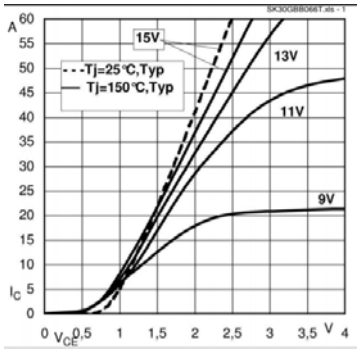


Figura 5 - Curva Ic x Vce do módulo de potência SK 30 GBB 066 T

Diversas técnicas para monitoramento da condição do dispositivo foram propostas (Lu, 2009), (Estima, 2011), (Xiang, 2012), (Brown, 2012), (Zhou, 2013). De acordo com a literatura, o predecessor de falha mais promissor utilizado para monitoramento de condição dos "*wire bonds*" de um módulo de potência é a medição da tensão v_{ce}, uma vez que ela irá aumentar com a degradação do material(Ji, 2013). Porém, alguns aspectos influenciam no seu valor, sendo esses a temperatura de junção e a corrente na qual o conversor está funcionado. Essa influência é facilmente percebida através da figura 5, retirada da folha de dados do módulo de potência SK 30 GBB 066 T da fabricante Semikron.

O componente com maior capacitância térmica em um conversor é o dissipador de calor. Conforme pode ser observado na figura 6 (Ji, 2013), a temperatura do dissipador de calor relaciona-se diretamente com a temperatura de junção do módulo de potência. Com isso, para uma mesma carga podemos ter diferentes valores para a tensão v_{ce}.

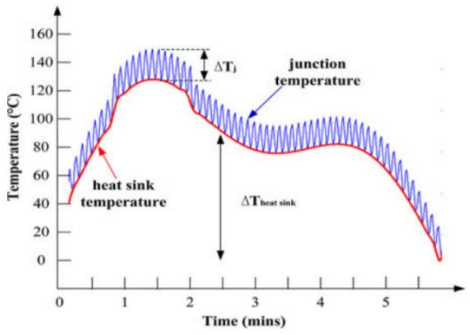


Figura 6 - Comportamento da temperatura de junção(Ji, 2013)

Nesse trabalho é implementado o circuito para monitoramento de condição do IGBT através da

medição da tensão v_{ce} proposto em (Beczkowski, 2013). O melhor momento para realizar esse monitoramento, considerando as particularidades do processo, também é discutido. O texto é organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta o conversor utilizado para implementação do circuito, na seção 3 é detalhado o circuito utilizado para monitoramento do IGBT e suas características, a seção 4 discute o melhor momento para a aquisição de dados. Os resultados experimentais são apresentados na seção 5, seguido pelas conclusões na seção 6.

2 Conversor *Fault Tolerant ANPC* baseado em IGBT

Proposto em (Rocha, 2014), basicamente o conversor FT-ANPC é um conversor que possui a capacidade de se reconfigurar na ocorrência de falhas de semicondutores. Sua topologia monofásica pode ser visualizada por meio da figura 7.

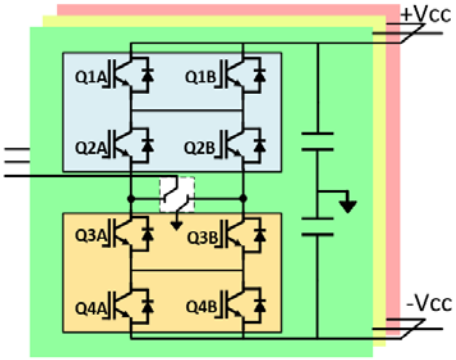


Figura 7 - Topologia do conversor FTANPC

Como pode ser visualizado, os IGBT's Q1B e Q4B, com seus respectivos diodos de roda-livre, foram adicionados a topologia típica ANPC. Além disso, foi adicionado uma chave estática capaz de reconfigurar o ponto de conexão com o neutro, tornando o sistema configurável de diversas maneiras.

A chave estática tem como função trocar o braço do conversor que será conectado ao neutro e como consequência o outro será conectado à fase. Por exemplo, se o braço A for conectado a fase, necessariamente o braço B será conectado ao neutro.

Sabendo que o conversor pode operar como NPC ou ANPC, podemos observar que as chaves Q1A e Q1B, Q4A e Q4B são redundantes entre si, necessitando apenas de um redirecionamento dos pulsos de *gate* na ocorrência de falha ou degradação de um dos componentes.

Pensando na falha de uma chave interna teremos duas situações: a primeira relacionada a falha de um dispositivo que estivesse conectado a fase, nesse caso o conversor deverá parar o funcionamento e a chave estática ser comutada e a partir desse momento o conversor passa a funcionar como NPC. O segundo caso ocorre quando a chave alvo do evento de falha atua como grampo ativo, nesse caso o conversor passa a funcionar como NPC e não será necessário a comutação da chave estática. (Ferreira, 2016)

As possibilidades descritas acima mostram que o conversor pode continuar funcionando mesmo na ocorrência de falhas consecutivas. É importante salientar que todas as reconfigurações estão vinculadas à falha do dispositivo em circuito aberto, seja por uma anomalia interna, seja por um problema em seu circuito de comando.

3 Monitoramento de Condição do Módulo de Potência

Um dos predecessores de falha mais promissores no monitoramento do IGBT é a tensão v_{ce}. Como mostra a figura 8 (Beczkowski, 2013), a tensão Vce aumenta à medida em que o dispositivo degrada pela fadiga termomecânica em seus fios de ligação.

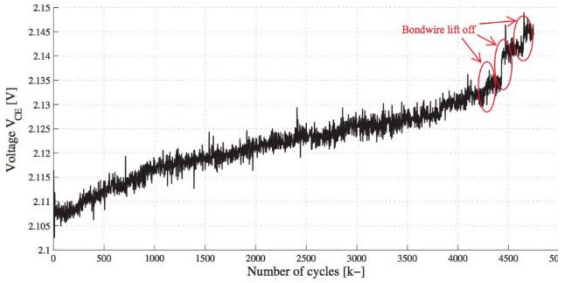


Figura 8 - Comportamento da tensão vce com a degradação do dispositivo (Beczkowski, 2013)

Existe, portanto, a necessidade de um circuito especializado para prover a medição da tensão Vce com o IGBT em condução. Esse circuito deve apresentar duas características, a de bloquear a tensão do barramento c.c quando o IGBT se encontrar bloqueado e de medir variações da ordem de unidades de mili volts.

O circuito utilizado foi proposto em (Beczkowski, 2013) e seu diagrama encontra-se apresentada através da figura 9.

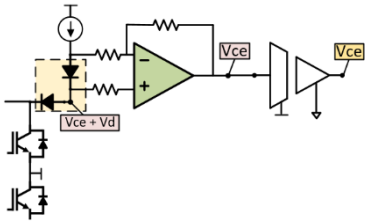


Figura 9 - Circuito para medição do vce do IGBT

O funcionamento do circuito de medição se divide em duas situações, a primeira é quando o IGBT se encontra bloqueado, com isso o diodo é polarizado inversamente e é bloqueado o aparecimento da tensão do barramento c.c no circuito de medição.

A segunda ocorre quando o IGBT é ligado e o diodo de bloqueio é polarizado diretamente. Fazendo com que a corrente proveniente da fonte de corrente seja conduzida através dos diodos e a tensão $V_{CE} + V_{d1}$ apareça no terminal não inversor do amplificador.

A tensão v_d é compensada através da entrada inversora, que estará submetida a tensão $v_{ce} + v_{d1} + v_{d2}$, através da equação 1 podemos visualizar a tensão de saída:

$$Vo = 2(Vce + V_{d1}) - (Vce + V_{d1} + V_{d2}) \qquad (1)$$

Considerando que os diodos possuam uma tensão de polarização direta idêntica, a tensão de saída será igual a v_{ce}. A similaridade dos diodos é de extrema importância para o funcionamento do circuito, com isso torna-se necessário um acoplamento térmico entre os diodos para minimizar diferenças entre as tensões e, como consequência, erros na medição.

Como pode ser visualizado através do circuito, a tensão medida na saída do amplificador operacional tem como referência o emissor do IGBT, sendo necessário a inserção de um circuito isolador para gerar outro ponto de referência, conforme apresentado na figura 9.

4 Técnicas de Medição

De acordo com (Choi, 2017) existem três modos distintos de medição da tensão, online com carga comportada, online com carga variável e v_{ce} off-line com carga conhecida.

4.1 Online com carga comportada

Esse método baseia-se na condição de que a carga conectada ao conversor seja conhecida e comportada, ou seja, mesma potência de saída e frequência. Nessas condições a medição da tensão v_{ce} deverá ser realizada sempre nas mesmas condições de contorno, mesma corrente e fator de potência.

Uma condição de contorno que poderá influenciar na medição é a temperatura do dissipador de calor, porém, ela pode ser facilmente compensada utilizando o fator de correção obtido através da figura 10, retirada de (Choi, 2017).

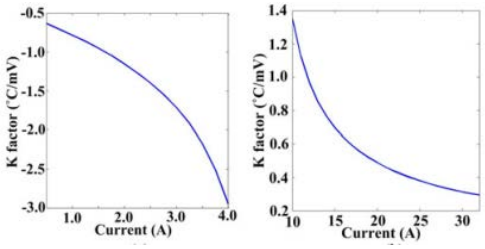


Figura 10 - Fator de correção da tensão vce (Choi, 2017)

Devido a distância entre o dissipador de calor e a junção do módulo de potência, uma temperatura de 10ºC no primeiro não corresponderá a 10ºC na junção do dispositivo. Porém, essa diferença torna-se insignificante se comparada a diferença de tensão correspondente a degradação do dispositivo, que é da ordem de 100mV. (Choi, 2017)

4.2 Online com carga variável

Essa condição considera que a carga do sistema muda frequentemente, tendo um comportamento não previsível ou constante. Essa seria a situação mais crítica e mais comum no ambiente industrial, porém a medição torna-se mais complexa, pois dependendo da condição anterior do sistema para uma mesma corrente de saída a tensão v_{ce} terá valores distintos.

4.3 Off-line com carga conhecida

O monitoramento off-line baseia-se em coletar as medições em momentos no qual o conversor esteja ocioso ou antes de ligar/desligar o conversor. Nesses instantes, a saída do conversor seria comutada da carga normalmente conectada para uma carga conhecida e fixa. Os autores defendem essa técnica como a mais adequada para o gerenciamento da degradação dos dispositivos de potência.

Para compensar variações provenientes da temperatura do dissipador, podemos utilizar o mesmo fator de compensação proposto no método online. A medição de Vce deve ser realizada em instantes nos quais a temperatura do *baseplate* /dissipador seja sempre a mesma, uma vez que o dissipador é o elemento com maior capacitância térmica do sistema.

5 Resultados Experimentais

Para resultados experimentais foi projetado e montado três placas de circuito impresso, que implementam uma fase do conversor FTANPC capaz de acionar um motor de 10cv. Foram utilizados dois módulos SK 30 GBB 066 T do fabricante Semikron, apresentado na figura 12. A Figura 11 mostra a placa de potência finalizada do conversor FT-ANPC.

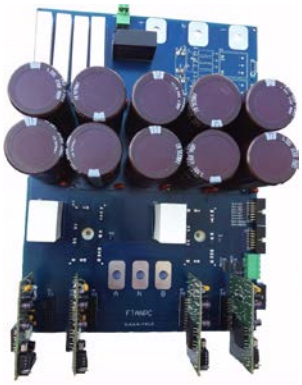


Figura 11- PCB monofásica do conversor FTANPC

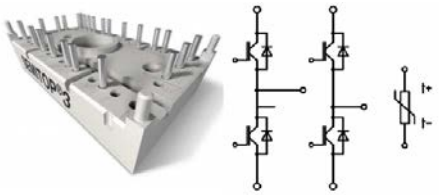
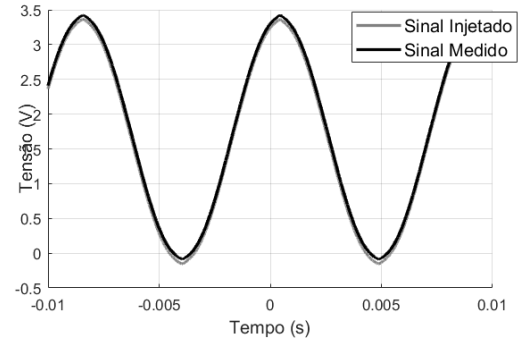


Figura 12- Módulo Comercial SK30GBB066 T

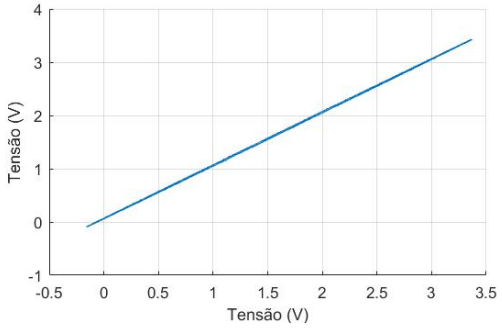
O circuito de medição apresentado na Figura 9 foi incorporado ao gate drive dos módulos de potência, dando origem a um gate drive inteligente, com as funcionalidades de acionamento, proteção e medição de Vce. A Figura 13 apresenta o gate drive construído, com o circuito de medição de Vce.

Figura 13- Gate Drive com medição de vce

O sistema de medição de Vce foi calibrado com a injeção de um sinal senoidal conhecido. O mesmo sinal medido foi observado na saída de medição incorporada ao gate drive. Os dois sinais são apresentados na Figura 14(a). Na figura 14(b) encontra-se o valor do sinal de entrada em relação ao sinal obtido na saída, com isso observou-se que o circuito de medição possui um offset de 60mV e uma boa linearidade no intervalo típico para valores de v_{ce}.



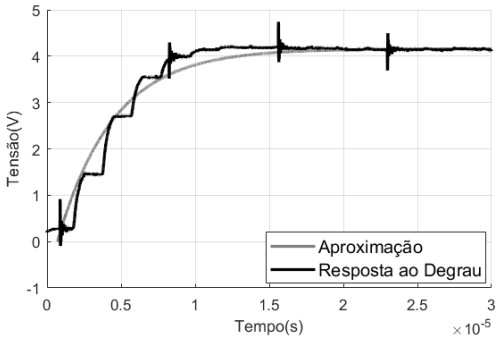
(a)



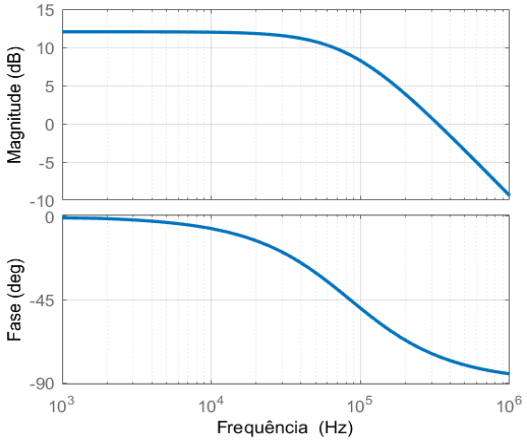
(b)

Figura 14 - Caracterização do circuito de medição

Para caracterização do sistema na frequência foi observado a resposta do sistema ao degrau, figura 15(a) e aproximado de um sistema de primeira ordem. Sua resposta na frequência encontra-se apresentada através da figura 15(b). O sistema apresentou uma faixa de passagem de 70kHz, sendo possível sua utilização de maneira conservadora em frequências de até 7kHz.



(a)



(b)

Figura 15 - Resposta ao Degrau do sistema de medição

As condições dos módulos de potência do conversor devem ser monitoradas continuamente para se detectar a iminência de falhas. Quando a falha iminente é identificada, ações podem ser tomadas de forma antecipada, tornando irrelevante o modo de falha para a estratégia de reconfiguração do conversor. Monitorando a integridade do dispositivo podemos comutar para seu sobressalente, programando convenientemente sua parada para manutenção.

De acordo com (Choi, 2017) a medição da tensão de v_{ce} deve ocorrer sempre no mesmo valor de corrente de saída. Porém um ponto muito importante a ser observado é o duty-cycle da modulação nessa carga, pois devido ao atraso intrínseco do circuito de medição o tempo que o IGBT estiver fechado pode não ser suficiente. Pode-se visualizar o atraso do circuito de medição na Figura 16, que mostra os valores da saída do circuito especializado de medição e a mesma variável obtida com uma ponta de prova diferencial.

A medição se estabiliza com aproximadamente 90µs, com isso se o IGBT for acionado por um tempo menor que esse, a medição não será possível. Na figura 17 encontra-se apresentado um teste no qual a medição não foi possível.

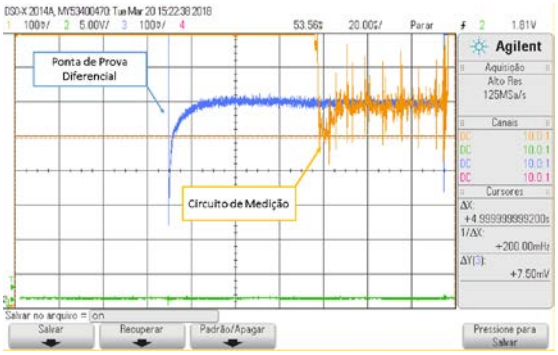


Figura 16- Atraso do sistema de medição

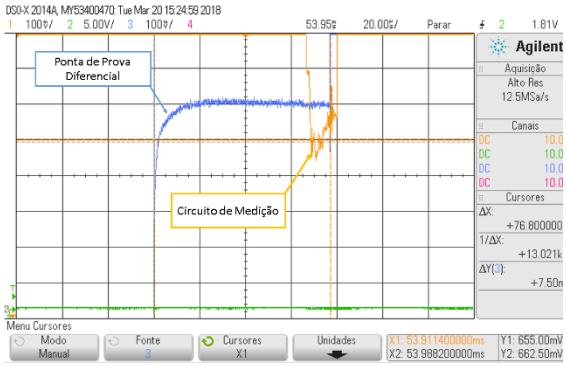


Figura 17- Medição online com tempo insuficiente para medição

Conclui-se que a medição *on line* e *on time* durante a operação do conversor, além de desnecessária para todos os propósitos de gerenciamento da degradação, é muito complexa, pois apresenta a necessidade de controle de muitas variáveis. A título de ilustração, o perfil de corrente do motor em um processo de laminação é apresentado na figura 18 para um dia de funcionamento.

Observa-se que a carga possui um comportamento bastante variável, com picos desiguais de corrente e vales durante as paradas, onde o motor é desligado, dificultando ainda mais o monitoramento *on line* da tensão v_{ce}. Além disso, o processo de degradação é bastante lento, com isso, se o objetivo do monitoramento da tensão de v_{ce} for para analisar a degradação do dispositivo, torna-se desnecessária a medição frequente do componente.

Devido aos pontos levantados utilizou-se o monitoramento off-line no protótipo montado. Na figura 18 foram marcados alguns pontos em que a medição poderia ocorrer sem influenciar no processo de laminação.

O circuito montado para comutação do sistema do motor para uma carga conhecida encontra-se apresentado na figura 19.

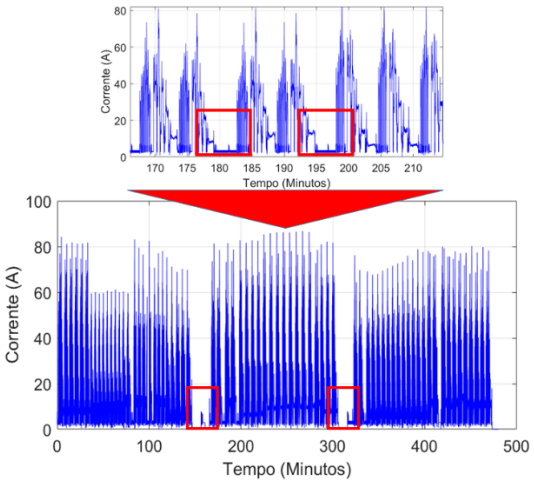


Figura 18- Perfil de carga de um laminador

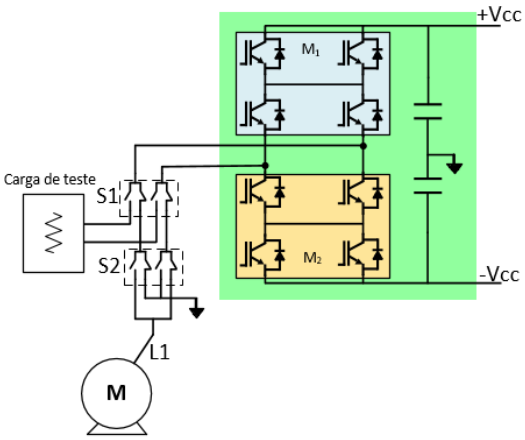
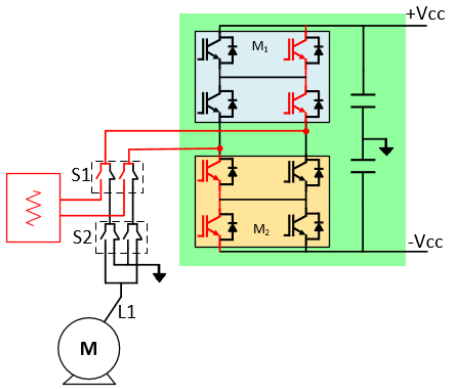


Figura 19- Circuito para monitoramento off-line do IGBT

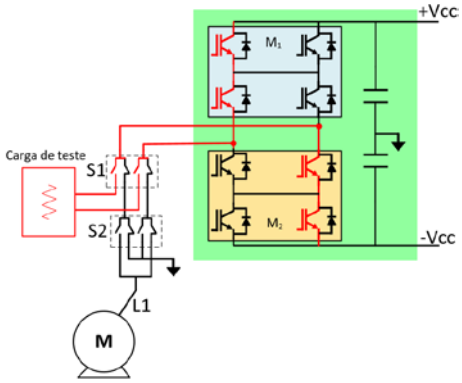
A chave S1 é responsável por comutar o sistema entre o motor e a carga fixa e conhecida para medição, já a chave S2 fará a função de comutar os pontos na ocorrência da falha de alguma das chaves internas. Para ambas as chaves foram utilizados um contator comercial da fabricante Schneider modelo LC1D258M7.

A cada ciclo de teste é possível a medição de 4 IGBT's simultaneamente, a figura 20 apresenta a filosofia de medição de uma das fases do conversor, além de demonstrar que com dois ciclos monitoramos a condição das 8 chaves.

Na figura 21 foi realizado a medição apresentada na figura 20 (b) e monitorado a condição de uma das chaves.



(a)



(b)

Figura 20- Filosofia de monitoramento dos IGBT's

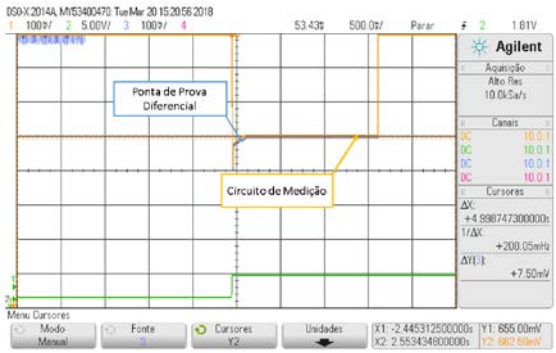


Figura 21- Monitoramento Off-line do IGBT

O sinal medido possui um comportamento constante, acarretando em uma fácil coleta de resultado. Além de o sinal de medição possuir um erro de 1.1%(7.5mV).

6 Conclusões

Foi projetado e montado o conversor tolerante a falhas trifásico FTANPC, coletado resultados e desenvolvido uma filosofia para medição da degradação dos dispositivos.

O circuito de medição foi caracterizado demonstrando uma boa linearidade e o offset inerente será compensado via software.

Foram apresentados os problemas inerentes ao monitoramento online da tensão de v_{ce} tais como temperatura de operação, carga de saída do conversor e fator de potência da carga/*duty-cycle*.

Os resultados obtidos demonstram que a medição off-line da tensão v_{ce} possui como características:

- Desacoplamento do fator de potência;
- Medição sempre ocorrerá com uma carga conhecida;
- Capaz de medir mesmo em cargas caóticas;
- Pequenos intervalos no processo de produção tornam viável o monitoramento de condição dos dispositivos;

7 Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o suporte financeiro fornecido pela CAPES - Brasil, CNPQ e FAPEMIG.

Referências Bibliográficas

Yang, Shaoyong; Xiang, Dawei; Bryant, Angus; Mawby, Philip; Ran, Li and Tayner, Peter (2010). Condition Monitoring for Device Reliability in Power Electronic Converters: A Review. IEEE Transactions on Power Electronics.

Wang, Huai; Liserre, Marco; Blaabjerg, Frede; (2013). Toward Reliable Power Electronics. IEEE Industrial Electronics Magazine.

Wu, Rui; Blaabjerg, Frede; Wang, Huai; Liserre, Marco; Iannuzzo, Francesco(2013). Catastrophic Failure and Fault-Tolerant Design of IGBT Power Electronic Converters - An Overview. IEEE Industrial Electronics Society, IECON.

Choi, Ui-Min; Blaabjerg, Frede; Jorgensen, Soren; Munk-Nielsen, Stig; Rannestad, Bjorn (2017). Reliability Improvement of Power Converters by Means of Condition Monitoring of IGBT Modules. IEEE Transactions on Power Electronics.

Lu, Bin; Sharma, Santosh K. (2009). A Literature Review of IGBT Fault Diagnostic and Protection Methods for Power Inverters. IEEE Transactions on Industry Applications.

Estima, Jorge O.; Cardoso, Antonio J. Marques (2011). A New Approach for Real-time Multiple Open-circuit Fault Diagnosis in Voltage-Source Inverter. IEEE Transactions on Industry Applications.

Xiang, Dawei; Ran, Li; Tayner, Peter; Yang, Shaoyong; Bryant, Angus; Mawby, Philip (2012). Condition Monitoring Power Module Solder Fatigue Using Inverter Harmonic Identification. IEEE Transaction on Power Electronic.

Brown, Dougals W.; Abbas, Manzar; Ginart, Antonio; Ali, Irfan N.; Kalgren, Patrick W.; Vachtsecanos, George J. (2012). Turn-off Time as na Early Indicator of Insulated Gate Bipolar Transistor Latch-up. IEEE Transactions on Power Electronics.

Zhou, Shengqi; Zhou, Luowei; Sun, Pengju; (2013). Monitoring Potential Defects in na IGBT Module Based on Dynamic Changes of the Gate Current.

Ji, Bing; Pickert, Volker; Cao, Wenping; Zahawi, Bashar; (2013). In Situ Diagnostics and Prognostics of Wire Bonding Fault in IGBT Modules for Electric Vehicle Drives. IEEE Transactions on Power Electronics.

Beczkowski, Szymon; Ghimre, Pramod; Veja, Angel Ruiz de; Munk-Nielsen, Stig; Rannestad, Bjorn; thogersen, Paul(2013). Online Vce Measurement method for wear-out monitoring of high power IGBT modules. 15th Eurpean Conference on Power Electronics Applications(EPE).

Rocha, Anderson V.; Silva, Sidelmo M.; Pires, Igor A.; Machado, Alysson A. P.; Amaral, Fernando V.; Ferreira, Victor N.; Paula, Helder de; Filho, Braz J. Cardoso(2014). A New Fault-Tolerant Realization of the Active Three-level NPC Converter. ECCE.

Ferreira, Victor N.; Mendonça, Gabriel A.; Rocha, Anderson V.; Resende, Robson S.; Filho, Braz J. Cardoso(2016). Medium Voltage IGBT-based Converters in Mine Hoist Systems. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting.