ACIONAMENTO DE MOTOR SÍNCRONO DE IMÃ PERMANENTE PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS ATRAVÉS DO CONVERSOR 3L-DC-SSI

Matheos Coletto Wermuth [1]

Guilherme Sebastiao Da Silva [2]

Resumo:

A utilização de veículos elétricos está em ascendência atualmente devido a busca por transportes confiáveis e que agridam menos o meio ambiente, assim, utilizam motores elétricos como meio de propulsão. Eles são compostos de uma ou mais máquinas elétricas, por um sistema de alimentação, e um sistema de conversão, acionamento e controle dessa máquina. Como o Motor Síncrono de Imã Permanente (PMSM, do inglês Permanent Magnet Synchronous Machine) que é utilizado devido a sua eficiência, menor necessidade de manutenção, facilidade de implementação de um sistema de freio regenerativo e menor peso. A evolução na tecnologia de energia fotovoltaica torna este meio muito atrativo a sua implementação para a alimentação de veículos elétricos, porém, como depende de fatores climáticos, a sua resposta instantânea para o sistema é baixa, assim, sendo necessário a adição de bancos convencionais de baterias. Para que o controle do PMSM seja realizado, é fundamental o uso de um dispositivo que converta a corrente contínua do banco de baterias e painéis fotovoltaicos para corrente alternada, este dispositivo é denominado Inversor de Frequência. Existem diversas topologias de circuito capazes de realizar tal feito, porém, a mais otimizada para se trabalhar com duas fontes de alimentação independentes é a denominada Three-Level Diode-Clamped Split-Source Inverter (3L-DC-SSI). Neste trabalho, propõe-se o uso do 3L-DC-SSI para alimentação e controle de um PMSM utilizando uma modulação conhecida como Phase Disposition Pulse Width Modulation (PDPWM) com referência geométrica, que dispondo de tensões contínuas e um controle por meio de comparação de três ondas diferentes, gera sem sua saída, tensões alternadas senoidais após a sua filtragem. Fazendo-se uso do software SIMULINK, presente no MATLAB, o inversor foi simulado junto a modulação PDPWM e uma aproximação simples do PMSM como carga (um ramo RL, resistivo e indutivo). Suas ondas de tensão e corrente de fase foram analisadas, constatando os três níveis de tensão projetados. Com os três níveis de tensão atingidos, o estresse na carga é reduzido, já que as ondas de saída do inversor são mais suaves e mais próximas à uma tensão senoidal usual. Com isso, afirma-se que o 3L-DC-SSI é confiável para o acionamento e controle de um PMSM utilizando a modulação e as fontes de alimentação citadas anteriormente.

Palavras-chave: Inversor, Modulação, Veículos Elétricos

Modalidade de Participação: Iniciação Científica

ACIONAMENTO DE MOTOR SÍNCRONO DE IMÃ PERMANENTE PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS ATRAVÉS DO CONVERSOR 3L-DC-SSI

[1] Aluno de graduação. conetto197@gmail.com. Autor principal

[2] Docente. guilhermesilva@unipampa.edu.br. Orientador

ACIONAMENTO DE MOTOR SÍNCRONO DE IMÃ PERMANENTE PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS ATRAVÉS DO CONVERSOR 3L-DC-SSI

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, veículos elétricos estão começando a ser implementados no cotidiano da sociedade mundial, sendo vistos com frequência em grandes cidades, principalmente em transportes públicos, como trens e ônibus, que utilizam motores elétricos como meio de propulsão. Veículos elétricos geralmente são compostos de uma ou mais máquinas elétricas, por um sistema de energia (que alimenta estes motores) e um sistema de conversão, acionamento e controle de velocidade dessas máquinas. Veículos elétricos fazem parte de um grupo de meios transportes extremamente limpos, já que não utilizam combustíveis fósseis, apresentam emissão de poluentes para a atmosfera praticamente nula e também colaboram para a diminuição da poluição sonora, já que motores elétricos são consideravelmente mais silenciosos que seus competidores à combustão (ABDELHAKIM, 2016).

Existem diversos tipos de motores utilizados comercialmente em veículos elétricos. Para este artigo foi escolhido um motor do tipo Síncrono de Imã Permanente (PMSM, do inglês *Permanent Magnet Synchronous Machine*) devido a sua maior eficiência, menor necessidade de manutenção (devido a ausência de um circuito elétrico do rotor que é substituído por um imã permanente de terras raras), maior facilidade na implementação de um sistema de freio regenerativo, ou seja, quando os freios do veículo forem acionados a desaceleração da máquina causará o recarregamento parcial das baterias do veículo, e menor peso e tamanho ao compará-lo com motores de indução. Porém, o PMSM precisa de um controle preciso e mais complexo do que as demais variações de motores devido ao seu campo magnético não poder ser regulado de acordo com a necessidade do sistema (KHOUCHA, 2013).

Com a evolução tecnológica voltada aos sistemas fotovoltaicos (PV, do inglês *photovoltaic),* este tipo de geração energética torna-se muito atrativa para a aplicação na área veicular, devido a sua confiabilidade e sustentabilidade (KHOUCHA,2013). Porém, sistemas PV apresentam baixa resposta instantânea para o sistema, já que dependem de fatores climáticos, então é vantajoso utilizar um equipamento de controle e abastecimento que possa aliar o sistema PV com o banco de baterias que já é amplamente utilizado na indústria. Para que o controle do PMSM seja feito com eficiência é necessário o uso de dispositivos chamados Inversores de Frequência, que convertem correntes e tensões contínuas (vindas do banco de baterias e dos sistemas PV) em correntes e tensões alternadas (usadas na alimentação do motor). Existem diversas topologias de inversores capazes de realizar tal tarefa, como *full bridge, NPC, Z-Source,* entre outras, porém estas não são otimizadas para utilizar duas fontes de alimentação diferentes e é neste quesito em que a topologia chamada de *Three-Level Diode-Clamped Split-Source inverter* (3L-DC-SSI) se destaca.

Logo, para que seja possível o uso do banco de baterias convencional aliado ao sistema PV para o abastecimento e controle de um PMSM, propõe-se o uso do 3L-DC-SSI por meio da modulação conhecida como *Phase Disposition Pulse Width Modulation* (PDPWM) com abordagem geométrica, que utilizando tensões contínuas e um controle que tem como base a comparação de três ondas diferentes, gera em sua saída tensões alternadas senoidais após a sua filtragem.

2 METODOLOGIA

2.1 CIRCUITO EQUIVALENTE PMSM

Baseando-se em pesquisas bibliográficas fez-se uma análise do circuito equivalente do PMSM. Motores síncronos são máquinas elétricas utilizadas para converter energia elétrica alternada para energia mecânica. Para demonstrar o circuito equivalente de um PMSM, utiliza-se o circuito equivalente de um Motor Síncrono convencional, já que a única diferença entre os dois modelos é a substituição do circuito de campo presente no rotor por um conjunto de imãs permanentes. Denomina-se E_a a tensão interna que é produzida em uma fase do motor síncrono. No entanto, esta tensão E_a não é a mesma que é aplicada aos terminais do motor quando este está conectado a uma fonte de alimentação, o único momento em que a tensão interna E_a é igual a tensão nos terminais V_ϕ é quando o motor está operando a vazio, ou seja, sem cargas conectadas em seu eixo e sem correntes percorrendo a sua armadura.

Existem diversos fatores que contribuem para a diferença entre a tensão interna e a tensão dos terminais. O efeito mais presente é a reação de armadura. Quando uma tensão V_ϕ é aplicada no terminal de um motor síncrono fará com que o seu rotor gire e então uma tensão E_a é induzida internamente nos enrolamentos do estator do motor. Ao conectarmos uma carga ao eixo do motor uma corrente irá circular pela armadura. Contudo, uma corrente trifásica circulando em um condutor gerará um campo magnético que distorce o campo magnético original do rotor alterando a tensão de fase resultante. Ou seja, a tensão por fase é simplesmente a soma da tensão interna E_a com a tensão da reação de armadura Eest:

$$V_\phi = E_\mathrm{a} + E_\mathrm{est} \tag{1}$$

A tensão de reação de armadura pode ser modelada como um indutor em série com a tensão aplicada aos terminais. As bobinas do estator têm uma autoindutância e uma resistência. Como a autoindutância e os efeitos de reação de armadura são ambos representados por reatâncias é comum combiná-los em uma única reatância, chamada de reatância síncrona da máquina X_s. Considerando a corrente de armadura como I_a e a resistência de armadura como Ra a tensão da reação de armadura será dada pela seguinte relação:

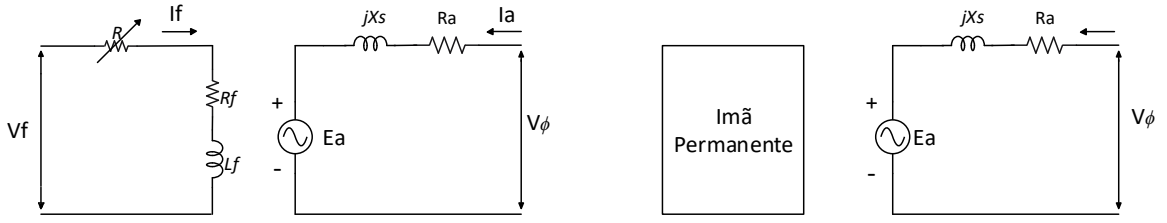
$$E_\mathrm{est} = I_\mathrm{a}\left(R_\mathrm{a} + jX_\mathrm{s}\right) \tag{2}$$

Então, a relação final entre as tensões do terminal e a induzida internamente na máquina para cada fase será:

$$V_\phi = E_\mathrm{a} + I_\mathrm{a}\left(R_\mathrm{a} + jX_\mathrm{s}\right) \tag{3}$$

Através da Lei de Kirchhoff das tensões obtém-se o seguinte circuito da Figura 1, o qual representa cada uma das três fases da máquina elétrica.

Figura 1 – Circuito equivalente por fase Motor Síncrono e PMSM.



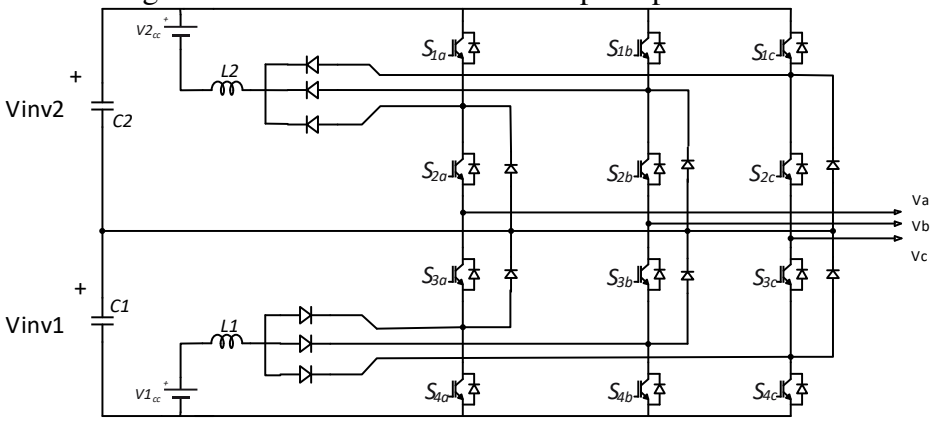
O modelo apresentado anteriormente se refere à apenas uma fase elétrica, porém, ao considerarmos o circuito trifásico completo a dedução para as fases adjacentes será a mesma, apenas defasando-as de 120° positiva ou negativamente dependendo de sua configuração (sequência positiva ou sequência negativa).

Ao analisar o comportamento do PMSM, é possível perceber que para demonstrações simples, este pode ser modelado apenas por uma carga RL (resistiva e indutiva).

2.2 *THREE-LEVEL DIODE-CLAMPED SPLIT-SOURCE INVERTER*

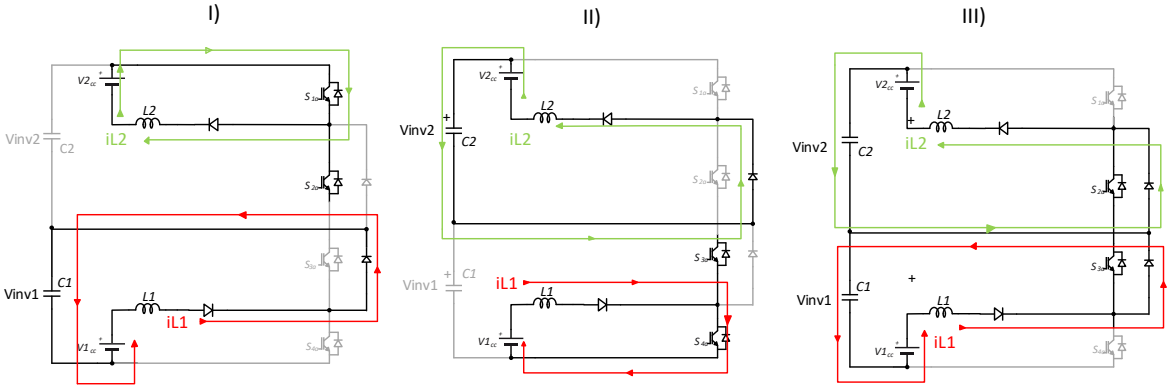
O 3L-DC-SSI é a integração de um inversor com fontes divididas (SSI) a um inversor *NPC*. Esta integração utiliza duas fontes isoladas de corrente contínua (CC), que podem ser, dois indutores, duas baterias, dois capacitores, ou até uma bateria e um painel PV, seis diodos para a realização da ponte que fará tanto a inversão da frequência em três níveis quanto o aumento da tensão de saída em um estágio de operação. O circuito do 3L-DC-SSI é mostrado na figura a seguir:

Figura 2 – Three-Level Diode-Clamped Split-Source Inverter.



As fontes isoladas são responsáveis por carregar os dois capacitores conectados através da ponte inversora, onde V2cc carrega C2 através do indutor L2 e V1cc carrega C1 através do indutor L1. O indutor superior L2 é carregado quando S1a ou S1b ou S1c está ligado como mostra a Fig. 3I e descarrega, quando S1a, S1b e S1c estão desligados ao mesmo tempo como mostra a Fig. 3II e Fig. 3III. Já o indutor inferior L1 inferior usa S4a, S4b ou S4c para carregar, exemplificado pela Fig. 3II, enquanto a sua descarga é realizada quando S4a, S4b, S4c estão desligados simultaneamente como mostrado na Fig. 3I e Fig. 3III. A seguir, utilizando a fase A o processo anterior é demonstrado, porém é valido a ressalva de que este processo acontece de maneira idêntica para todas as três fases:

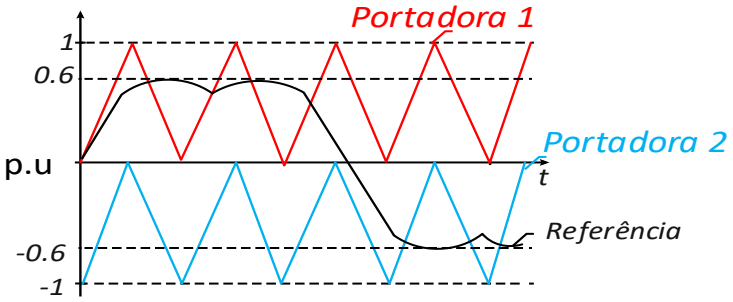
Figura 3 – Estágios de funcionamento 3L-DC-SSI.



2.3 MODULAÇÃO PDPWM COM REFERÊNCIA GEOMÉTRICA

Para que o conversor supracitado opere da maneira projetada é utilizada uma lógica para o acionamento de suas chaves (IGBTs). Esta lógica é denominada PDPWM, onde uma onda geométrica, denominada referência, é comparada a duas ondas triangulares, denominadas portadoras, que apresentam a mesma fase, porém estão deslocadas no plano cartesiano. A frequência da referência determina a frequência da tensão de saída do conversor e a frequência da onda portadora determina frequência de chaveamento dos IGBTs. A lógica compara a onda geométrica às portadoras, quando a referência tiver um valor de amplitude maior ou igual as ondas portadoras um sinal lógico "1" é enviado ao IGBT, que faz com este se feche, quando a referência tiver a amplitude menor, o sinal lógico "0" é enviado, assim os IGBTs serão abertos, a interação entre as ondas é demonstrada na figura a seguir.

Figura 4 – Interação entre a onda de referência e as portadoras.



3 RESULTADOS e DISCUSSÃO

Utilizando o software SIMULINK disponível no MATLAB, simulou-se o circuito do 3L-DC-SSI e um modelo simplificado do PMSM utilizando a modulação geométrica PDPWM, com os parâmetros listados na Tabela 1 e para uma frequência de 50 Hz e tempo de simulação de 0,8 segundos.

Tabela 1 – Parâmetros de simulação (valores aproximados de pico em regime).

V1cc	**V2cc**	**Vinv1**	**Vinv2**	**C1 e C2**	**L1 e L2**	**Carga**		**Vϕ**	**Iϕ**
100 V	100 V	200 V	200 V	10 mF	1 mH	5 Ω	0,5 mF	198 V	24 A

Com isto, obteve-se os resultados para a corrente e tensão de fase na carga RL apresentados respectivamente na Figura 5 e na Figura 6.

É possível perceber que a corrente de fase apresenta o mesmo formato da onda de referência devido à natureza indutiva da carga, que age praticamente como um filtro. Já a onda de tensão apresenta a característica de uma modulação PWM de três níveis clássica, o que era esperado para este inversor, vale ressaltar que as ondas das outras duas fases (B e C) apresentam a mesma característica, apenas sendo defasadas de 240° e de 120° elétricos respectivamente.

Ambas as ondas estão com um tempo de transitório de cerca de 0,15 segundos e valores de pico em regime permanente aceitáveis para esta configuração, sendo aproximadamente 198 V para a tensão e 24 A para a corrente. Os três níveis de modulação são muito beneficiais para o circuito, já que estes reduzem a quantidade de harmônicos na saída do inversor e além disso reduzem o estresse na carga, já que a onda originalmente gerada é muito mais próxima de uma onda senoidal convencional, facilitando a sua filtragem

Figura 5 – Corrente na fase A (Ampere x Segundo).

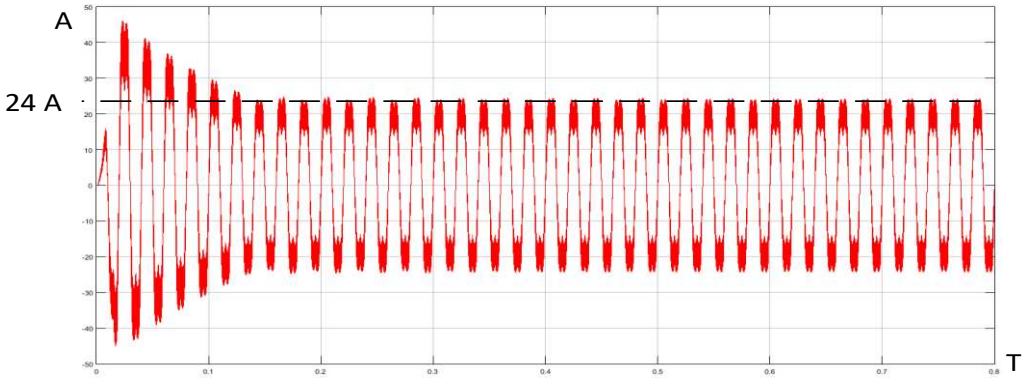
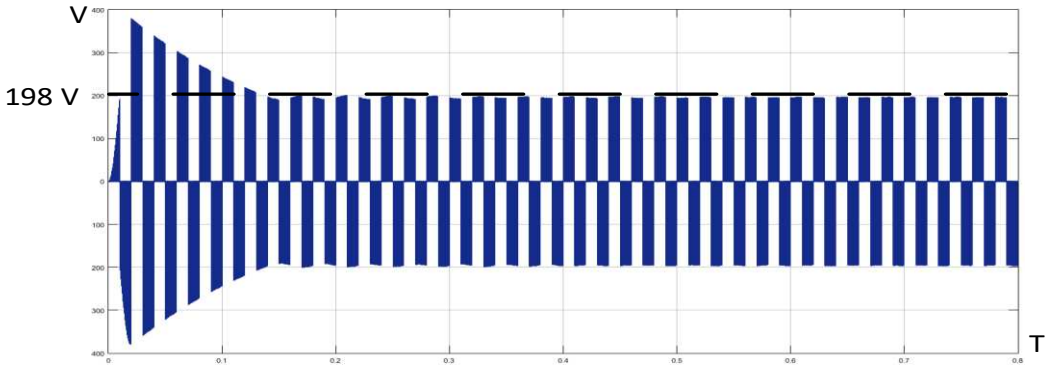


Figura 6 – Tensão na fase A (Volts x Segundo)



4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido a resposta consistente e os três níveis de tensão e corrente de fase atingidos com a modulação geométrica PDPWM, pode-se afirmar que o inversor 3L-DC-SSI é confiável para o acionamento e controle de um PMSM utilizando duas fontes de tensão contínua independentes (banco de baterias e painéis fotovoltaicos), assim sendo possível aumentar a eficiência e aplicabilidade do sistema em veículos elétricos. Com os três níveis atingidos, o estresse tanto na carga quanto nos componentes do circuito é reduzido já que as ondas de saída do conversor apresentam variações de tensão muito mais suaves e próximas a tensões senoidais usuais, tornando o inversor versátil e durável, podendo ser configurado para diversas aplicações diferentes. Para o futuro é previsto o uso de um modelo mais fiel ao PMSM para que os testes tenham mais precisão, controle de velocidade, além da implementação do método de partida Volts/Hertz, que fará com que o acionamento deste motor seja mais suave e seguro.

REFERÊNCIAS

ABDELHAKIM, A; MATTAVELLI, P. Analysis of the Three-Level Diode-Clamped Split-Source Inverter . 2016. 6 p. Universidade de Padova, Italia, 2016.

CHAPMAN, Stephen J**. Fundamentos de Máquinas Elétricas** 5° ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 271 – 306 p.

KHOUCHA, F.; BENRABAH, A.; HERIZI, O.; KHELOUI, A.; BENBOUZID, M. An Improved MPPT Interleaved Boost Converter for Solar Electric Vehicle Application**. IEEE POWERENG 2013,** Istambul, Turquia. pp.1076-1081, Maio. 2013.