

Análise e desenvolvimento de uma chave de partida estática (Soft Starter)

Claudio Gabriel Venceslau Vale
Dept. de Engenharia e Tecnologia
Universidade Federal Rural do
SemiÁrido-UFERSA
Mossoró, Brasil
claudio.vale@alunos.ufersa.edu.br

Bruno Emmanuel de Oliveira Barros
Luna
Dept. de Engenharia e Tecnologia
Universidade Federal Rural do
SemiÁrido-UFERSA
Mossoró, Brasil
bruno.luna@ufersa.edu.br

Resumo—Este trabalho visa projetar uma chave de partida estática para reduzir a corrente de partida de motores de indução trifásicos. Realizando isso através da programação de um sistema de controle das fases dos tiristores e da sua simulação computacional, a fim de analisar o comportamento dos parâmetros elétricos durante o período de acionamento do motor. A variação do ângulo de disparo foi ajustada com precisão, gerando uma diminuição da corrente de partida em comparação com a partida direta, possibilitando o ajuste do tempo de acionamento e de tensão inicial pelo operador, alcançando o objetivo proposto.

Palavras chaves— Chave de partida estática. ângulo de disparo. Controle de fase dos tiristores.

I. INTRODUÇÃO

Os motores de indução trifásicos correspondem a cerca de 60% do consumo da energia elétrica de países industrializados e são amplamente utilizados em diversos setores industriais e comerciais devido à sua robustez, eficiência e simplicidade de operação [1].

Mesmo com esses benefícios, a elevada corrente de partida deste tipo de motor que pode chegar de 6 a 10 vezes sua corrente nominal [2], pode gerar consequências indesejadas como a redução da vida útil do equipamento devido ao aumento do desgaste dos componentes do motor, além de aumentar os custos da instalação elétrica, já que ela deve ser capaz de suportar esse pico de corrente.

A fim de reduzir essa corrente pode-se utilizar dispositivos de acionamento de motores, que reduzem a tensão de partida, a fim de diminuir a corrente e o conjugado inicial. Dessa forma, é possível reduzir significativamente os distúrbios na rede ocasionados por elevadas correntes e torque excessivo na carga mecânica, prevenindo o problema de desgaste excessivo.

Entre os possíveis métodos de redução de corrente de partida existentes estão: estrela triângulo, chave compensadora e soft starter, sendo o soft starter, o que tem o melhor desempenho entre eles.

Este tipo de partida atua no controle da tensão aplicada ao motor durante seu acionamento, gerando uma aceleração gradual e controlada do motor até que ele atinja a velocidade nominal. Seu funcionamento é baseado no controle do ângulo de disparo de tiristores, sendo capaz de variar a tensão eficaz enviada a carga ao longo do tempo através do chaveamento da tensão da fonte em diferentes fases da onda, entregando

apenas parte da onda para a carga. A figura 1 ilustra esse fenômeno, mostrando em laranja a parte da onda que irá ser repassada da fonte para a carga.

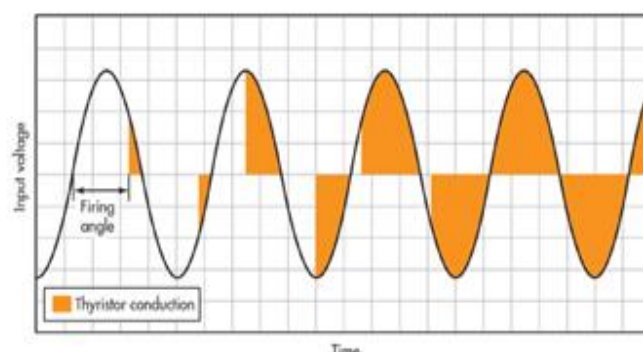


Fig. 1. Ângulo de disparo do valor de tensão usando tiristores.[3]

Essa variação de tensão CA usando tiristores é aplicada não só em partida de motores, como controle de aquecimento em sistemas industriais, iluminação regulável etc.

Neste artigo será apresentado a análise e desenvolvimento de um variador de tensão CA por controle de fase com o objetivo principal de atenuar a corrente de partida de um motor trifásico, através do controle da tensão entregue ao motor. Além de analisar o comportamento desse sistema para diferentes tipos de carga.

Para alcançar esses objetivos será abordado diferentes modelos matemáticos que podem ser usados para a obtenção do ângulo de disparo para cada valor de tensão eficaz, com o intuito de linearizar o valor da tensão na partida tornando a mais próxima do ideal.

Para o desenvolvimento dessa chave de partida, será realizada a seleção adequada dos tiristores, a implementação dos circuitos de disparo e controle, a programação de um microcontrolador para geração desses sinais de disparo e a integração do sistema em um simulador, além de realizar experimentos para avaliar o desempenho do controlador de fase.

Espera-se que esse trabalho contribua no entendimento da dinâmica de funcionamento desse tipo de sistema.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

Chaves de partida estática ou soft starter é uma chave de estado sólido utilizada para realizar o acionamento em motores de indução de forma suave.

A. Tiristores

O controle do chaveamento de partida é feito por tiristores, que nada mais são do que uma família de semicondutores que operam em regime chaveado, eles são formados por quatro camadas semicondutoras formando uma sequência p-n-p-n [4]. O tipo de tiristor mais usado nas chaves de partida estática é o SCR que funciona como um diodo controlado pelo terminal de gatilho, onde ao alimentar o terminal de Gate ele permite a passagem da corrente do anodo para o catodo. Diferente dos transistores, os tiristores não precisam de alimentação constante no Gate para permitir a passagem da corrente, já que com apenas um pulso é possível manter a passagem da corrente desde que se mantenha uma corrente mínima nos entre anodo e catodo [5].

É possível descrever o comportamento de um tiristor como a junção de dois transistores sendo um do tipo PNP e outro NPN [6] como mostrado na figura 2. Nesta configuração ao colocar um pulso na porta, o transistor NPN é ativado, permitindo a corrente do anodo para a base do transistor PNP, que conseqüentemente gera sua ativação e alimenta a base do NPN, fazendo a corrente entre anodo e catodo permanecer.

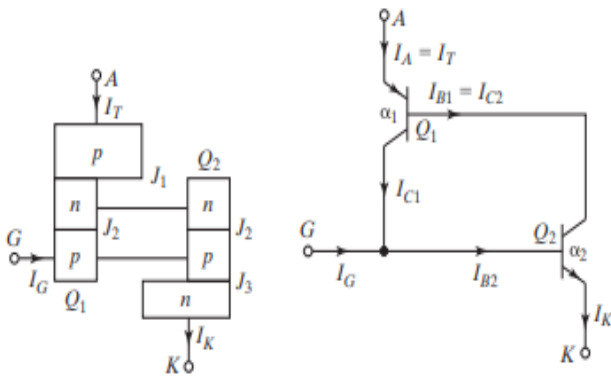


Fig. 2. Representações esquemáticas de um tiristor [6].

B. Soft starter

Na chave de partida soft starter esses tiristores são colocados em antiparalelo e ficam entre a fonte e a carga [7], funcionando a partir da variação do seu ângulo de disparo, que controla a corrente de partida por meio da variação da tensão eficaz aplicada a carga. Neste tipo de controle a frequência da tensão fornecida ao motor é mantida constante e é igual a frequência da fonte de alimentação.

Esse chaveamento é feito a partir de sinais emitidos por um microcontrolador, que comanda dois semicondutores em cada uma das fases, capaz de variar o tempo de envio dos sinais que comandam cada tiristor, fazendo as 3 fases da tensão CA receberem o mesmo aumento progressivo do ângulo de disparo, até que atinja a tensão nominal.

A figura 3 mostra a configuração básica de um circuito de ligação de um motor trifásico com o sistema soft-starter onde os dados da tensão na fonte serão recebidos pela interface analógica do microcontrolador que irá chavear os tiristores a partir desses dados de entrada.

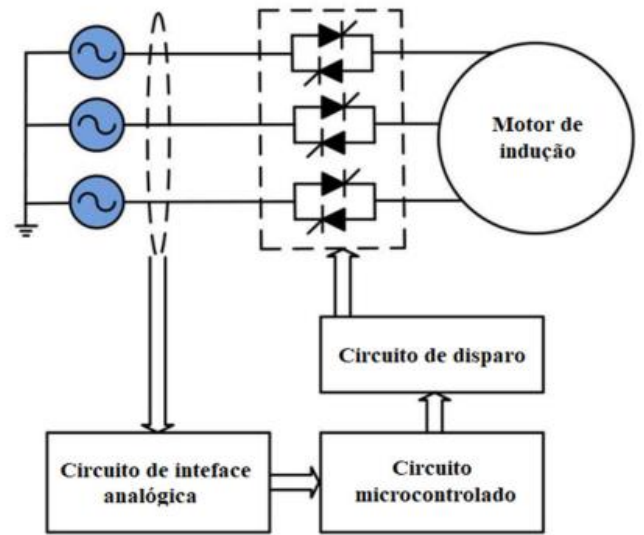


Fig. 3. Esquema de funcionamento de um soft starter [8].

Esse modelo de atenuação de corrente de partida se mostra vantajoso em relação a alguns outros métodos como a partida direta, que consiste na ligação da tensão da fonte diretamente na carga, o que torna seu conjugado de partida maior, mas por outro lado possui uma elevada corrente durante o acionamento. Já a partida estrela triângulo possui uma transição entre o repouso e a velocidade nominal mais suave que a partida direta, já que durante esse período ele está conectado em estrela e, portanto, terá uma tensão de linha maior, o que ocasionará uma diminuição da corrente, em relação ao fechamento em triângulo, de tal forma que quando se atinge valores próximos a velocidade nominal ocorre a transição para a ligação em triângulo, porém, durante essa mudança, ocorre um elevado pico de corrente.

A figura 4 mostra o comportamento da corrente durante a partida de um motor trifásico utilizando os métodos de partida direta, estrela triângulo e soft-starter, onde é possível perceber que o acionamento por chave de partida estática produz a transição mais suave e menor corrente.

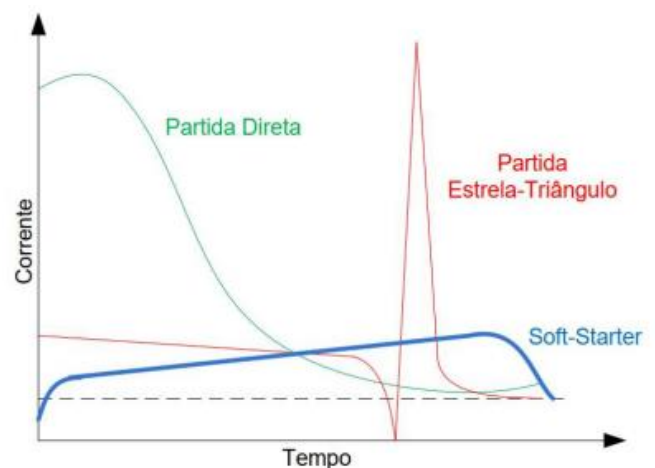


Fig. 4. Gráfico da corrente na partida de motores [9].

Há outras vantagens do soft-starter além da diminuição da corrente de partida, como a redução da queda de tensão da instalação, aceleração e desaceleração em rampa, evitando por exemplo golpes de aríetes em bombas centrífugas [2], não

utiliza chaves comutadoras manuais, reduzindo assim o arco elétrico, possui uma configuração digital o que permite uma grande variedade e aplicação [10]. Esse tipo de sistema também é capaz de realizar o controle de corrente durante a parada de máquinas, que gera como consequência uma desaceleração suave sendo muito úteis em algumas aplicações industriais, além de possibilitar um ajuste no tempo de acionamento e na sua tensão inicial.

Mesmo com esses benefícios, a diminuição da corrente de partida provoca um torque inicial menor em relação a partida direta, sendo, portanto, indicada para aplicações onde o torque inicial não é muito requisitado, além disso ela necessita de um tempo maior para atingir a velocidade nominal. Outra desvantagem está no valor de sua implementação que é maior que as outros tipos de partidas citadas e as distorções harmônicas que ela pode causar a rede elétrica.

O comportamento ideal das chaves de partida estática durante o acionamento de um motor é que a tensão que ela está submetida possua um aumento progressivo sem degraus de tensão, o que permite uma partida sem variações bruscas de corrente e conjugado [7].

Na figura 5 é possível observar um aumento linear de tensão que aumenta em formato de rampa até atingir a tensão nominal. A tensão inicial V_p é obtida pelo operador da partida, que irá ajustar no soft starter qual a menor tensão capaz de vencer a inercia total do sistema e o conjugado resistente da carga, fazendo o motor iniciar o giro [9], o tempo de partida T_p também pode ser definido pelo usuário e ele estabelece o período necessário para a tensão sair de V_p e atingir a tensão nominal [2].

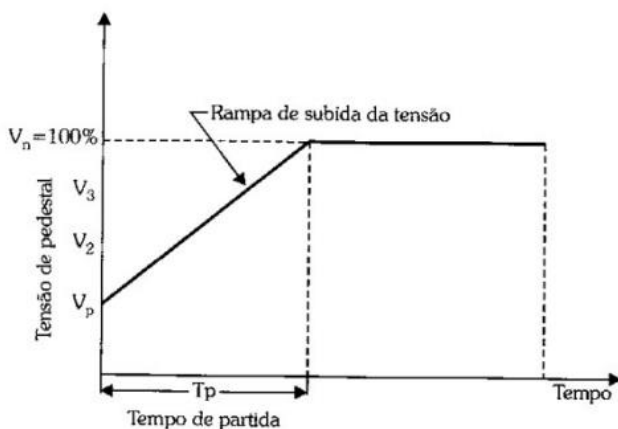


Fig. 5. Gráfico da rampa de subida na partida com Soft starter [2].

C. Tipos de cargas

Para que o soft starter tenha um bom desempenho é necessário que o aumento do nível da tensão eficaz na saída seja o mais linear possível. O sistema de controle do soft starter terá como saída o valor do ângulo de disparo dos tiristores, portanto é necessário definir uma equação que relacione a tensão RMS de saída com esse ângulo, para isso serão apresentados modelos matemáticos para diversos tipos de carga, a fim de que ele realize um bom desempenho para diferentes aplicações, sendo sua utilização mais simples em uma carga resistiva, como mostrado na configuração apresentada na figura 6.

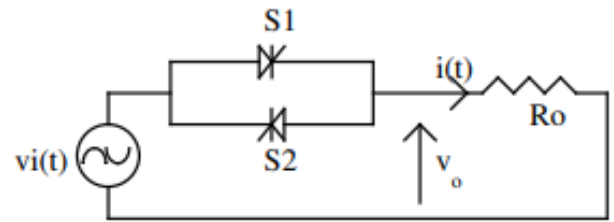


Fig. 6. Circuito de variador de tensão CA alimentando carga resistiva [11].

Na equação (1) onde V_i é a tensão máxima da fonte e α é o ângulo de disparo, é possível perceber que o modelo matemático utilizado para encontrar a tensão eficaz da carga resistiva utiliza como o período o valor de π , mesmo que a senoide tenha o dobro desse período. Isso ocorre porque o ângulo α no semicírculo negativo será o mesmo para o positivo causando uma simetria e permitindo essa simplificação. Outro motivo para o α não se modificar nos semicírculos presentes em um mesmo período é para diminuir as harmônicas que essa ação geraria [12].

$$V_{ORMS} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (V_i \cdot \sin \theta)^2 d\theta} \quad (1)$$

$$V_{ORMS} = \frac{V_i}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}} \quad (2)$$

A próxima configuração utiliza uma carga indutiva pura (Figura 7), que apresenta um comportamento que é típico de um Reator Controlado por Tiristor (RTC).

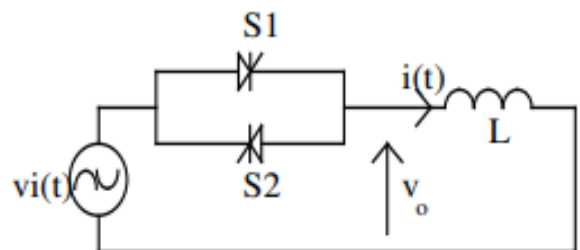


Fig. 7. Circuito de variador de tensão CA alimentando carga indutiva [11].

Nesse modelo só é possível ângulos de disparos entre 90 e 180 graus, já que para ângulos menores, a corrente que passa pelo tiristor S1 não terá se anulado quando ocorrer o pulso para chavear S2, de tal forma que esse tiristor não poderá entrar em condução, podendo acarretar em uma corrente unidirecional onde só o tiristor S1 irá conduzir ou ocasionar uma corrente bidirecional, mas não controlada caso o pulso enviado para S2 seja mantido durante todo o semicírculo negativo. A equação (3) mostra a equação da tensão eficaz em função do ângulo de disparo para uma carga indutiva [11].

$$V_{ORMS} = \frac{V_i}{\sqrt{2}} \cdot \left(\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right) \quad (3)$$

O terceiro modelo analisado é com carga RL (Figura 8), que assim como o modelo indutivo também possui um ângulo de disparo mínimo, mas este depende da impedância da carga associada a ele [11].

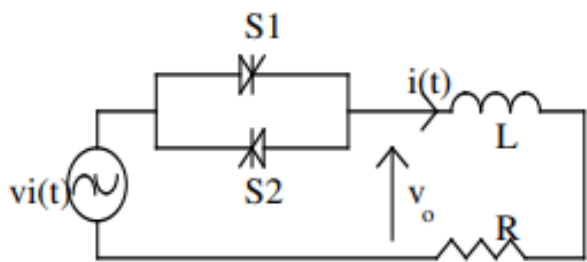


Fig. 8. Circuito de variador de tensão CA alimentando carga RL [11].

Nesta configuração a tensão RMS não vai depender somente do ângulo alpha, mas também estará em função do ângulo de extinção beta, como representado na equação (4) [13].

$$V_{0RMS} = \frac{Vi}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left[\beta - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} - \frac{\sin(2\beta)}{2} \right]} \quad (4)$$

Os diferentes tipos de ângulos relacionados a tensão e corrente nos tiristores estão ilustrados na Figura (9), onde o α representa o ângulo entre o início da senoide e o momento em que o tiristor conduz, o β representa a distância entre o momento da condução e o momento em que a corrente retorna para 0 e o θ o ângulo em que ele permanece conduzindo corrente [14].

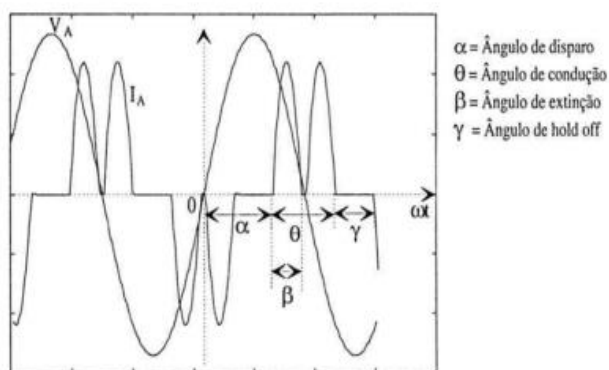


Fig. 9. variáveis envolvidas no controle do ângulo de fase [14].

D. Motor de indução

Além dos modelos de carga mostrados anteriormente, a associação mais comum de acionamento usando tiristores é na partida de motores de indução trifásicos. Esses dispositivos são formados por um estator e um rotor montados sobre mancais e rolamentos, separados entre si por um “gap” de ar (entreferro). O estator representa a parte que fica estática durante o giro do motor e é formado por um núcleo ferromagnético laminado com bobinas distribuídas uniformemente em suas ranhuras, com eixos defasados entre si 120 graus elétricos, que formam um sistema trifásico simétrico. O rotor possui formato cilíndrico com núcleo em aço laminado. A corrente alternada alimenta os enrolamentos do estator que induz corrente no rotor de tal forma que a interação dessas correntes dá origem a um conjugado eletromagnético que faz o motor funcionar [2].

O motor utilizado na simulação para análise do comportamento da partida é do tipo gaiola de esquilo, já que

ele é o mais utilizado na indústria. Este tipo de motor possui um rotor composto por barras condutoras, com o formato das ranhuras do rotor, que ficam curto-circuitadas por anéis condutores [15], essas barras são formadas geralmente de alumínio latão ou cobre, a junção entre as barras e os anéis formam uma peça única que lembra o formato de uma gaiola, justificando sua denominação. A figura 10 mostra o formato desse motor.

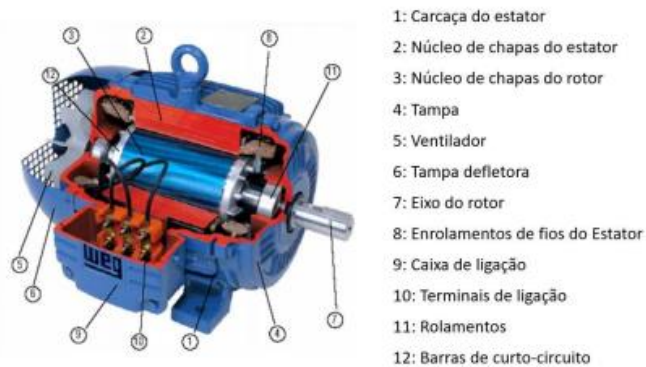


Fig. 10. Motor de indução gaiola de esquilo[7].

A vantagem desse tipo de motor em relação ao motor com rotor bobinado é que ele resulta em uma construção do induzido mais prática, rápida e barata. Trata-se de um motor de rápida produção, que não exige coletor e de rápida ligação a rede. Sua principal desvantagem é que seu torque de partida é reduzido em relação a corrente absorvida pelo estator [7].

A figura 11 mostra o circuito equivalente de um motor de indução trifásico, onde é possível perceber a existência de resistência e indutância no estator e no rotor, além da indutância mútua que um provoca sobre o outro.

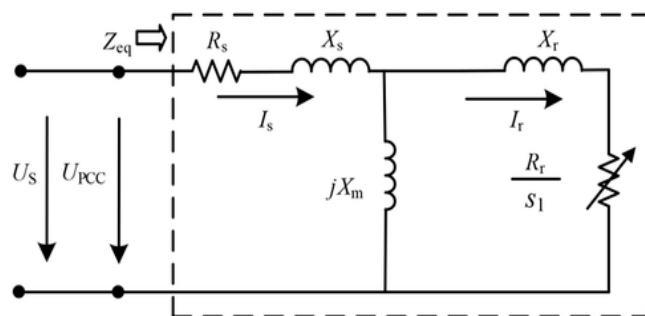


Fig. 11. Circuito equivalente de um motor de indução trifásico [8].

Em um motor de indução trifásico a determinação da tensão RMS em função do ângulo de disparo é bastante complexa, já que existem mais de um modo de operação com diferentes comportamentos, e a tensão não fica somente em função do ângulo alpha, mas também do ângulo de condução θ . O primeiro modo de operação é denominado modo 2/3 já que nele 2 ou 3 tiristores conduzirão ao mesmo tempo, a equação (5) mostra a tensão RMS em função de α e θ para essa configuração [14].

$$V_{0RMS} = Vi \sqrt{\frac{3}{4\pi} [\sin(2\alpha) - \sin(2\alpha + 2\theta)] + \frac{3\theta}{2\pi} - \frac{1}{2}} \quad (5)$$

O outro modo de funcionamento é o 0/2 onde 2 ou um tiristor irão conduzir ao mesmo tempo, porém como a carga é trifásica, quando apenas um tiristor estiver ativado não haverá condução, a equação (6) mostra a tensão RMS em função de α e θ para esse modo [14].

$$V_0 = V_i \sqrt{\frac{3}{4\pi} \left[\sin\left(2\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \sin\left(2\alpha + \theta + \frac{\pi}{3}\right) + \theta \right]} \quad (6)$$

As equações utilizadas para determinação do ângulo de disparo do motor foram modeladas a partir de uma carga RL simétrica trifásica. Para uma carga resistiva trifásica o ângulo correspondente ao modo de operação 0/2 estão entre 90 e 150 graus e a condição 2/3 está entre 90 e 0 graus, para a cargas RL a análise é muito mais difícil e a simulação fornece resultados que seriam extremamente difíceis de se obter analiticamente [12].

III. MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo desse trabalho consistiu no desenvolvimento de uma chave de partida soft starter, os detalhes a respeito do seu projeto e simulação serão detalhados nessa seção, as simulações computacionais usadas para teste e validação do projeto foram feitas no software PSIM, o código utilizado para controlar os tiristores foi programado em linguagem C.

A. Projeto

O circuito utilizado para a simulação do controle do motor de indução trifásico consistiu em uma fonte de tensão trifásica de sequência positiva, com 220V de tensão eficaz a uma frequência de 60 Hz, em série com uma indutância de 500 uH e uma resistência de 0,01Ω. Na carga foi utilizado um motor do tipo gaiola de esquilo com 6 polos, resistência e indutância no estator de 0,294Ω e 1,39mH; resistência e indutância no rotor de 0,156Ω e 0,74mH; indutância mútua de 41mH e momento de inercia de 0,4. Foram realizados testes para observar o comportamento do motor, utilizando uma carga mecânica com momento de inercia de 0,4 Kg · m² e torque de 10 N · m. Tudo isso feito com o intuito de que o modelo colocado na simulação fosse o mais próximo possível do real. A figura 12 mostra a partida do motor de indução trifásico simulado no PSIM.

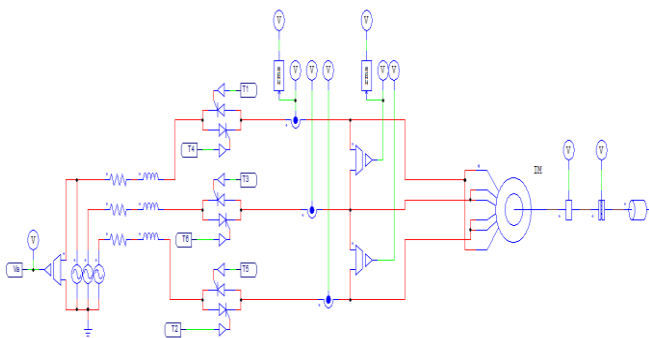


Fig. 12. Circuito da partida soft starter simulado no PSIM.

O microcontrolador responsável por chavear os tiristores teve como entrada a tensão de uma das fases da fonte e como saída o sinal enviado para cada tiristor. As leituras dos valores de tensão foram feitas a cada 100 microssegundos, para que fosse possível simular a velocidade de processamento dos valores analógicos do microcontrolador.

B. Programação

A identificação da frequência da rede, obtida de forma automática pelo microcontrolador, foi realizada pela contagem do número de medições feitas em cada período da senoide. Outro importante parâmetro identificado pelo microcontrolador foi a detecção dos pontos em que a senoide ia para o próximo semicírculo e a determinação se o semicírculo atual dela é o positivo ou o negativo, isso foi feito identificando os momentos em que os valores recebidos da tensão mudavam de sinal e se os valores de tensão de entrada eram positivos ou negativos naquele momento.

O valor de tensão RMS que deve ser submetido na carga para obter uma variação semelhante à mostrada na figura 5, foi determinado pela equação (7), onde 220 é o valor de tensão eficaz nominal da fonte, V_p representa o valor de tensão inicial e T_p o tempo de partida, ambos ajustados pelo operador.

$$V_{ORMS}(t) = \frac{220 - V_p}{T_p} t + V_p \quad (7)$$

Com o valor da tensão RMS para cada instante de tempo determinado, a detecção do ângulo alpha consistiu apenas em aplicar a equação (2), (3), (4) ou (5) a depender do tipo de carga acoplada. Porém, não há solução analítica para uma equação que isole o valor do α e o deixe em função da tensão eficaz, portanto esse valor foi obtido numericamente através da aplicação constante de um valor de alpha na equação que inicia em zero e se incrementa em uma unidade até que se encontre o alpha, para que a tensão encontrada a partir dela seja o mais próximo possível do valor desejado.

Na figura 13 é mostrado um diagrama simplificado do código utilizado no microcontrolador, nele é mostrado o controle de apenas um dos tiristores, como uma forma de simplificação. Mas o valor do ângulo utilizado no primeiro tiristor é o mesmo para os outros dentro de um mesmo período, porém cada um dos disparos deve ter um tempo de acionamento defasado em função do controle do semicírculo positivo ou negativo e da fase em que se está controlando.

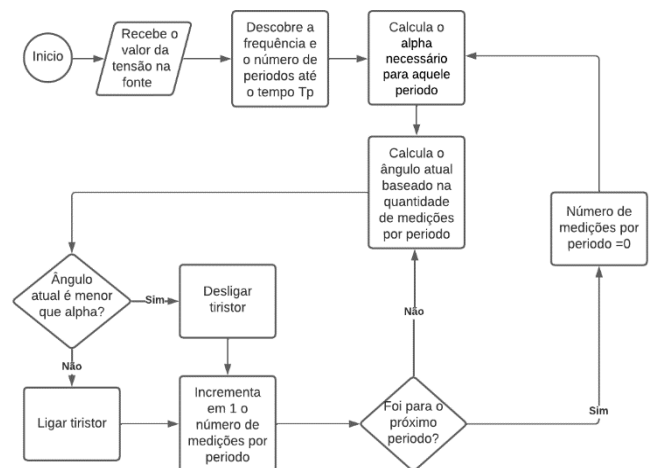


Fig. 13. Fluxograma do código utilizado.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O procedimento metodológico foi executado e os resultados obtidos a partir dele serão discutidos nessa seção.

A simulação da partida Soft starter foi realizada com diferentes tipos de carga a fim de verificar seu comportamento em cada uma das situações.

A figura 14 mostra a forma de onda da tensão de fase de uma partida feita em uma carga resistiva simétrica aterrada com variação linear do ângulo de disparo, onde é possível perceber de forma clara a interferência do chaveamento na tensão de saída.

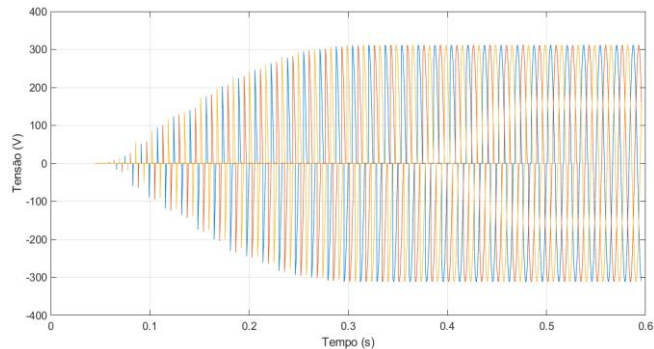


Fig. 14. Formas de onda da tensão de fase em uma carga resistiva aterrada.

Apesar de ter sido usado uma carga aterrada no exemplo anterior, ela foi colocada apenas para exemplificar de forma mais clara o chaveamento do tiristor, já que nessa configuração a forma de onda na saída quando chaveada é puramente senoidal, mas nas aplicações e imagens que se seguem as cargas não estarão aterradas a fim de simular melhor cargas trifásicas reais.

Os modelos matemáticos obtidos para os diferentes tipos de carga expostos nas equações (2), (3) e (4) foram feitos a partir da análise de cargas monofásicas e serão testados em cargas trifásicas, podendo, portanto, haver distorções em relação ao resultado esperado.

Aplicando a equação (2) na partida com carga resistiva trifásica equilibrada, a forma de onda da tensão RMS foi bem próxima da linear como pode ser observado no primeiro gráfico da figura 15, atingindo um resultado satisfatório.

Apesar da carga resistiva ser a mais simples é possível notar no segundo gráfico dessa mesma figura a não linearidade da variação do ângulo de disparo para produzir uma tensão linear. Em azul está representado a variação linear do ângulo e em vermelho a variação usada na carga.

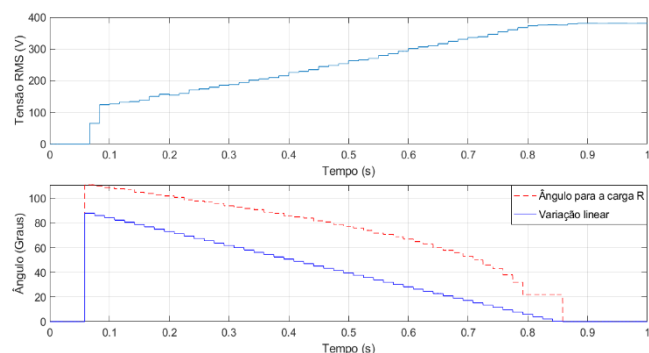


Fig. 15. Gráfico da tensão RMS e ângulo de disparo em uma carga resistiva.

Vale salientar que não há nenhum parâmetro da carga conectado a entrada do microcontrolador, e, portanto, a

linearidade da tensão foi atingida apenas usando modelos matemáticos.

O formato da onda de corrente e tensão na carga resistiva mostrados respectivamente pelos gráficos da Figura 16. Neles é possível perceber que há afundamentos de tensões e correntes que são provocados pelo chaveamento dos tiristores.

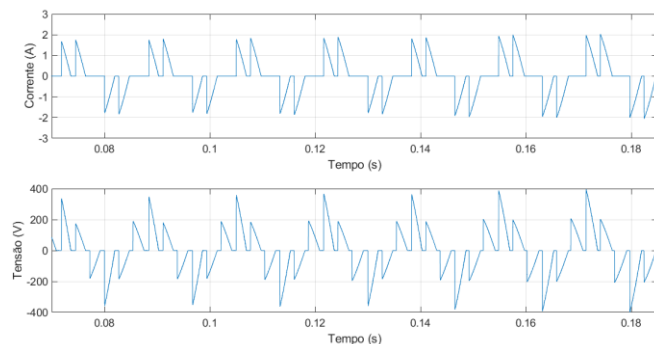


Fig. 16. Gráfico da corrente e tensão RMS em uma carga resistiva.

Na carga indutiva ao aplicar a equação (3) para linearizar a tensão, a forma de onda durante a partida (primeiro gráfico da figura 17) obteve um comportamento menos linear do que no caso da carga resistiva. Outro comportamento característico é que o aumento da tensão durou até o ângulo de disparo (em vermelho no segundo gráfico), chegar em 90° é característico do comportamento indutivo.

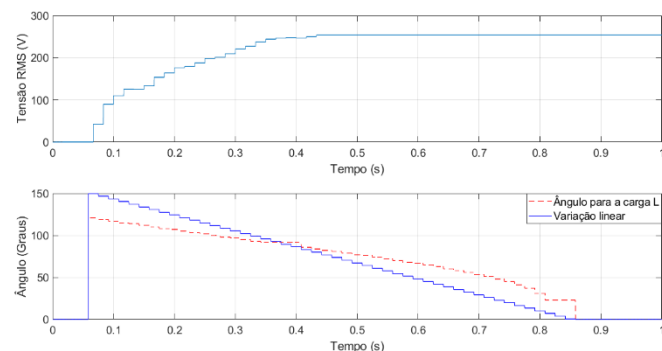


Fig. 17. Gráfico da tensão RMS e ângulo de disparo em uma carga resistiva.

Nas formas de onda de corrente e tensão da figura 18, é possível perceber que os momentos em que ocorrem o chaveamento os afundamentos de tensão geram variações de tensões que correspondem nos instantes em que os indutores descarregam, isso gera uma suavização nas curvas da corrente tornando-as arredondadas.

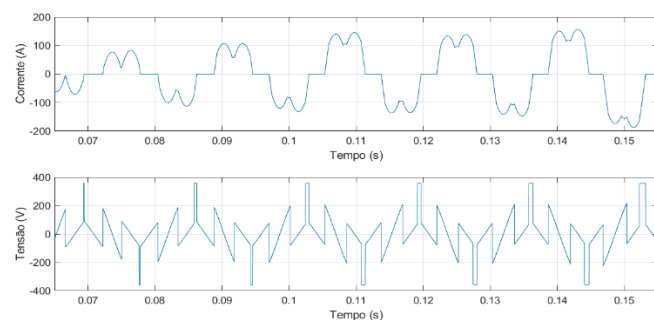


Fig. 18. Gráfico da corrente e tensão RMS em uma carga indutiva.

Para a carga RL que utilizou a equação (4), o valor do ângulo de extinção β considerado foi de $180^\circ - \alpha$. No comportamento da tensão eficaz presente na figura 19, é possível observar um pico de tensão no início da curva, mas um comportamento de baixa oscilação no restante do tempo de partida.

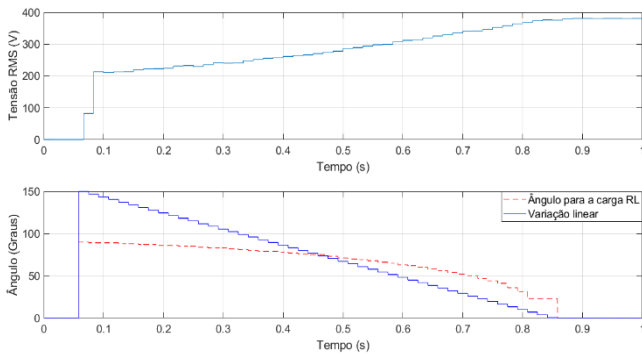


Fig. 19. Gráfico da tensão RMS e ângulo de disparo em uma carga resistiva.

Nas formas de ondas foi possível observar características da carga indutiva como variações de tensões durante o chaveamento e características resistivas como o formato triangular do decaimento da corrente.

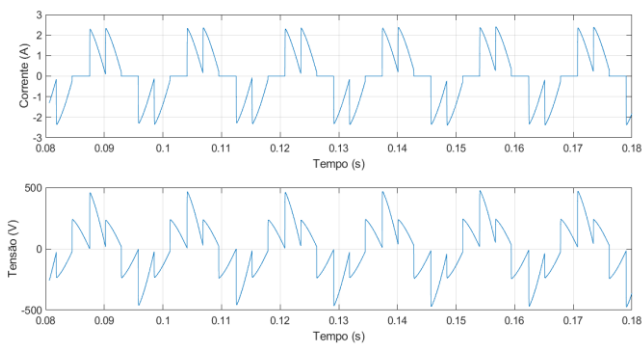


Fig. 20. Gráfico da corrente e tensão RMS em uma carga RL.

Por fim foi realizado o teste com o motor de indução trifásica do tipo gaiola de esquilo, com o intuito de observar a atenuação da corrente de partida em relação a partida direta e a partida estrela triângulo. O modelo utilizado foi o do modo 2/3 escolhido a partir da observação do comportamento dos tiristores na simulação.

A figura 21 mostra respectivamente a corrente eficaz, o torque e a velocidade nos 3 tipos de partidas. A partida direta (em vermelho) teve uma corrente inicial maior em comparação com as outras partidas, mas atingiu a corrente nominal mais rapidamente. Ela imprimiu um maior torque, mas com característica muito mais oscilatória e chegou a velocidade nominal de forma mais rápida. A partida estrela triângulo (em verde) teve um desempenho melhor na corrente, mas obteve mais oscilação no torque em comparação a soft starter. Por fim, a soft starter (em azul) atingiu picos de correntes menores que a partida direta, teve uma variação mais suave do torque do que as outras, mas levou mais tempo que elas para atingir a velocidade nominal.

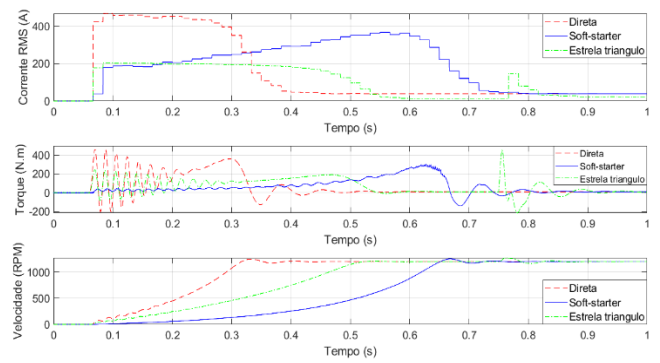


Fig. 21. Gráfico da corrente, torque e velocidade dos 3 tipos de partida.

A seguir é possível visualizar o comportamento da corrente, tensão e tensão eficaz do soft starter, ilustrado na Figura 22.

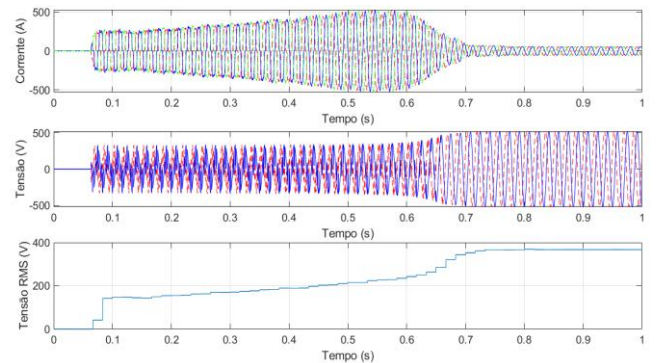


Fig. 22. Gráfico da corrente, tensão e tensão RMS de uma partida soft starter.

Por fim foi realizada a partida soft starter no motor com os diferentes tipos de modelos obtidos a fim de comparar quais seriam os mais viáveis para a realização da partida. Sendo os 3 primeiros modelos os que foram testados para cada tipo de carga e o último modelo que foi usado no motor. Com isso observou-se que o modelo de carga resistiva foi o único que gerou um pico de corrente maior que 400A, o modelo da carga RL gerou uma oscilação de torque elevada inicialmente. Sendo a carga indutiva e a modelada para o motor as que trouxeram melhores resultados.

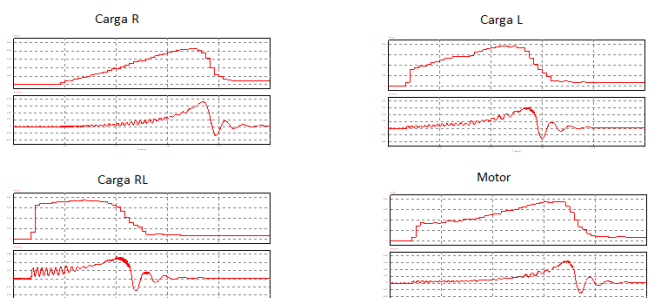


Fig. 23. Comportamento da partida soft starter usando cada tipo de equação.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo proporcionou, através de simulação em um ambiente computacional, a análise de curvas de um variador de tensão por controle de fase, utilizando diferentes

tipos de cargas simétricas trifásicas e a avaliação do seu desempenho para o controle da partida de um motor trifásico. além da comparação do seu desempenho com o de outros tipos de partida.

Dentre as análises de cargas trifásicas o modelo que obteve o maior êxito na linearização da tensão eficaz foi o da carga resistiva, houve uma não linearização maior nos outros tipos de cargas. As fontes dos possíveis erros na linearização foram devido ao modelo da equação da tensão em função do ângulo de disparo terem sido provenientes de cargas monofásicas, já que em cargas trifásicas o disparo dos transistores das outras fases influencia no resultado da saída, além de haver variações na forma de onda, dependendo do ângulo de disparo. Outro ponto de imprecisão é na determinação do ângulo de extinção β que foi considerado como $180^\circ - \alpha$ mas devido a descargas nos indutores esse valor pode ser maior, porém de difícil precisão.

Quanto aos resultados obtidos na partida do motor trifásico, o soft starter foi capaz de reduzir a corrente de partida em relação a partida direta e produziu um valor de torque mais linear que as outras partidas, trazendo um resultado satisfatório. Dentre a partida dos motores usando as equações dos modelos de diferentes cargas, o modelo carga indutiva teve o resultado mais satisfatório.

Como sugestão para trabalhos futuros seria conseguir meios mais precisos para determinar o ângulo de condução β , determinação automática do modo de operação do motor em cada momento da partida. Outra sugestão seria fazer o controle de malha fechada da partida do motor baseado nos parâmetros da saída.

REFERÊNCIAS

- [1] YGOR, C. A. et al. Estudo comparativo dos dispositivos convencionais de partida no acionamento de motores de indução trifásicos. In: CONFERÊNCIA DE ESTUDOS EM ENGENHARIA ELÉTRICA (CEEL), 8., 2010, Uberlândia. Anais [...]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2010.
- [2] MAMEDE FILHO, João. Instalações Elétricas Industriais. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 1288 p
- [3] GOTTSCHALD, Eduardo Cardoso. Soft-starter para partida de motores elétricos assíncronos. Abracopel, março de 2015. Disponível em: https://abracopel.org/blog/soft-starter-para-partida-de-motores-eletricos-assincronos/?doing_wp_cron=1683572625.2157750129699707031250. Acesso em: 10/05/2023
- [4] CORRADI JUNIOR, Romeu. Tiristor SCR- Retificador Controlado de Silício. Disciplina – Eletrônica Industrial – Informações Básicas. Edição Preliminar – 1.1. Campinas, 2005.
- [5] AZEVEDO, Vinícius Lima; MENDES, Luiz Eduardo. Análise transitória do motor de indução Trifásico. 2008. 64 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- [6] RASHID, Muhammad H. Eletrônica de Potência – Circuitos, Dispositivos e Aplicações. São Paulo: Makron Books, 1997.
- [7] FRANCHI, Claiton Moro. Acionamentos elétricos, Editora Érica Ltda, São Paulo, 2008.
- [8] JIANG, Fei et al. Adaptive soft starter for a three-phase induction-motor driving device using a multifunctional series compensator. IET Electric Power Applications, [S.L.], v. 13, n. 7, p. 977-983, 9 may 2019. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/iet-epa.2018.5079>. Acesso em: 01 out. 2021.
- [9] FREITAS, Stefani C. L. de et al. Estudo de harmônicas de corrente geradas na partida suave de motores de indução trifásicos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (SBSE), ISSN 2177-6164., 2012, Goiânia. Anais [...]. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2012.
- [10] LIMA, Marco Rogério Calheira. Desenvolvimento de um sistema eletrônico para partida de motores de indução trifásicos com controle programável da amplitude da corrente de partida. 1998. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 1998.
- [11] DECKMANN, Sigmar Maurer; POMILIO, José Antenor. Condicionamento de Energia Elétrica e Dispositivos FACTS, 2009.
- [12] HART, Daniel W. Eletrônica de potência: análise de projetos de circuitos. Porto Alegre: AMGH, 2012. 480 p.
- [13] AVELAR, Eduardo. Controle de ângulo de fase para uma carga indutiva e resistiva, 2017. Disponível em: <https://easytromlabs.com/arduino/arduino-lab-11-controle-de-angulo-de-fase-para-uma-carga-indutiva-e-resistiva-parte-1/>. Acesso em: 5 maio 2023.
- [14] SILVA, Cláudia Fernandes do Carmo. Análise do comportamento dinâmico do motor de indução no acionamento com chave de partida estática e inversor de frequência. Orientador: Dr. Cursino Brandão Jacobina. 2001. 126 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - UFPB, Campina Grande, 2001.
- [15] D. C. Machado, “Metodologia de cálculo de parâmetros do circuito elétrico equivalente de motores de indução trifásico de gaiola de esquilo de baixa potência,” Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 2014.