



XXIV SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

CB/GET/12

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - 14

GRUPO DE ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DA GESTÃO DA INOVAÇÃO TECNOLÓGICA - GET

ANÁLISE DE PERDAS, RENDIMENTO E CONJUGADO E PROJETO DE FILTRO ATIVO EM UM MOTOR MONOFÁSICO COM PARTIDA A CAPACITOR ALIMENTADO POR FONTE NÃO SENOIDAL.

(*) Erickson Alexandre R Barbosa André Cavalcante do Nascimento Marcus Ciro Gomes Yago Rezende
IFPA IFPA IFPA IFPA

RESUMO

O presente trabalho apresenta o estudo e análise do comportamento do motor de indução monofásico com partida a capacitor alimentado por uma fonte não senoidal em relação às perdas, rendimento e conjugado. Durante o trabalho foi demonstrado através da descrição de ensaios em bancada e simulação computacional, o comportamento do motor em seu funcionamento a vazio e a plena carga, submetido à distorção harmônica ao ser alimentado por uma fonte não senoidal. Além disso, foi proposto projeto de um filtro ativo monofásico. Para avaliação e teste do mesmo, foi utilizado na simulação com conteúdo harmônico para mitigar os efeitos adversos no motor.

PALAVRAS-CHAVE

Motor monofásico com partida a capacitor, distorção harmônica, qualidade da energia elétrica, filtro ativo.

1.0 - INTRODUÇÃO

A maioria dos estudos realizados com motores de indução é referente aos motores trifásicos, pois esses motores são largamente utilizados na indústria. Poucos são os estudos realizados com o mesmo propósito para os motores monofásicos, que são os mais apropriados para locais onde não existe um sistema de alimentação trifásico, como em residências, ambientes comerciais, equipamentos rurais, etc.

Os motores de indução monofásicos podem ser de diversos tipos, mas os de partida a capacitor e os de capacitor permanente são especialmente importantes pelo número de unidades produzidas e suas inúmeras aplicações, destacando que o conjunto de motores elétricos monofásicos é bem representativo em termos de um consumo de energia elétrica. Particularmente o de capacitor de partida é um tipo de motor mais popular, semelhante ao de fase dividida. Para melhorar o conjugado de partida relativamente baixo do motor de fase dividida, adiciona-se um capacitor eletrolítico, ligado em série com o enrolamento auxiliar de partida. Após a abertura do circuito auxiliar, o seu funcionamento é idêntico ao do motor de fase dividida.

Além disso, os motores monofásicos são largamente utilizados em aplicações residenciais e comerciais. Com o seu elevado conjugado de partida (entre 200% e 350% do torque nominal), o motor de partida a capacitor pode ser utilizado numa maior gama de aplicações, como: compressores, bombas para piscinas, equipamentos rurais, condicionadores de ar industriais, ferramentas em geral, e em outros componentes industriais e comerciais que necessitam de elevados conjugados de partida. É um motor de prateleira indicado para a maioria das aplicações existentes, exceto aquelas que exigem a reversão instantânea.

De uma forma geral, os motores elétricos são projetados para operação com fontes de alimentação senoidal e tensão nominal e frequência com valores constantes. Contudo, o grande número de dispositivos eletrônicos empregados nas instalações elétricas produz distorções de tensão, principalmente, nos sistemas de baixa tensão.

Uma das consequências de se ter distorção harmônica em fontes de alimentação de motores elétricos é a presença de componentes harmônicas de campo magnético girante, que produzem diversos efeitos sobre os motores elétricos. Um grupo de harmônicas tende a produzir campos girantes em sentidos opostos ao campo produzido pela componente fundamental, enquanto que outro grupo de harmônicas tende a criar campos que giram no mesmo sentido do campo fundamental. Além de aumentar o aquecimento do motor e reduzir seu rendimento, as harmônicas produzem aumento na vibração do motor, originada por pulsações de conjugado.

O presente trabalho apresenta o estudo e análise do comportamento do motor de indução monofásico com partida a capacitor alimentado por uma fonte não senoidal em relação às perdas, rendimento e conjugado. Durante o trabalho foi demonstrada através da descrição detalhada dos ensaios em bancada e simulação computacional, o comportamento e a análise de um motor monofásico com partida a capacitor em seu funcionamento a vazio e a plena carga, submetido à distorção harmônica ao ser alimentado por uma fonte não senoidal. Destaca-se que as simulações dos ensaios do trabalho foram realizadas com base em um motor comercial, demonstrando quais os fatores que devem ser levados em consideração para a melhor escolha da viabilidade técnica e econômica do motor.

Para tanto, utilizou-se o ambiente computacional Simulink/Matlab para modelagem matemática e estudo do motor na condição a vazio e a plena carga, sob condição sem conteúdo harmônico e na sequência, com conteúdo harmônico, associado à análise do comportamento das grandezas elétricas, como corrente e tensão, além de mecânicas do motor, como velocidade e conjugado. Além disso, foi realizado o projeto de um filtro ativo monofásico. Para avaliação e teste do mesmo, foi utilizado na simulação com conteúdo harmônico para mitigar os efeitos adversos no motor.

2.0 - ANÁLISE DE PERDAS, RENDIMENTO E CONJUGADO - ENSAIOS E SIMULAÇÃO

Serão descritas as simulações e os ensaios. Também são apresentados os parâmetros do motor. Após a apresentação dos valores experimentais e numéricos, os resultados de ambos serão comparados e analisados, em relação às perdas, rendimento e conjugado.

Inicialmente, descreveremos a metodologia dos ensaios para a obtenção dos parâmetros do motor

2.1 Ensaio a vazio a rotor bloqueado e a vazio para determinação dos parâmetros do motor

Para a realização das simulações é necessário levantar os parâmetros do motor segundo seu circuito elétrico equivalente. Os parâmetros são obtidos, via de regra, com base no método clássico que consiste basicamente em ensaiar o motor com o rotor bloqueado e com o motor em vazio.

2.2.1. Ensaio a rotor bloqueado

O ensaio com o rotor bloqueado é realizado em duas etapas: A primeira etapa consiste em alimentar o motor com o enrolamento auxiliar aberto. A tensão de alimentação vai sendo ajustada até que a corrente atinja o seu valor nominal. Neste ensaio são observados os valores de tensão, corrente e potência. A Figura 1 representa o ensaio com o rotor bloqueado.

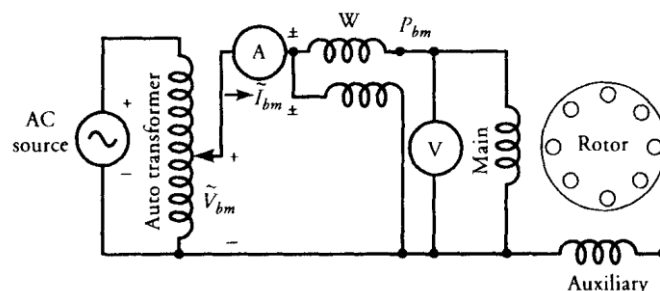


Fig. 1. Teste de rotor bloqueado com enrolamento auxiliar aberto

A segunda etapa do ensaio com rotor bloqueado consiste em alimentar o motor com o enrolamento principal aberto. A tensão vai sendo ajustada até que a corrente atinja o seu valor nominal no enrolamento auxiliar. Neste ensaio são observados os valores de tensão, corrente e potência. Os valores obtidos por meio do ensaio do motor com o rotor bloqueado e o enrolamento auxiliar aberto. A Figura 2 representa o circuito equivalente do motor para o ensaio com o rotor bloqueado e enrolamento auxiliar aberto:

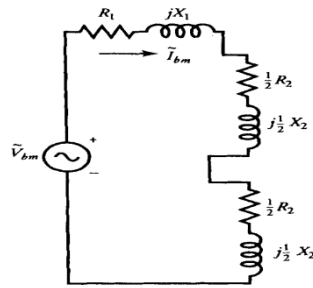


Fig. 2. Circuito equivalente aproximado com o rotor bloqueado e enrolamento principal aberto

De maneira análoga ao ensaio com o enrolamento auxiliar aberto, obtém-se os valores por meio do ensaio com o rotor bloqueado e enrolamento principal aberto.

2.2.2. Ensaio com o motor em vazio

O ensaio com o motor em vazio consiste basicamente em alimentar o motor com tensão nominal e com o enrolamento auxiliar aberto. Neste ensaio são observados os valores de tensão, corrente e potência. A Figura 3 representa o circuito equivalente do motor para o ensaio em vazio.

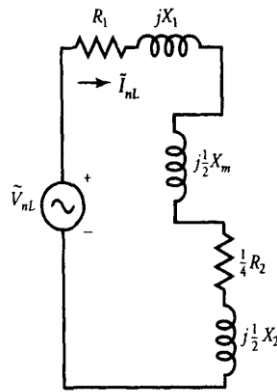


Fig. 3. Circuito equivalente aproximado para o ensaio a vazio

2.2.3. Parâmetros da simulação

Para a realização das simulações no ambiente SIMULINK foram utilizados os seguintes parâmetros apresentados abaixo:

Enrolamento principal (estator):

$R_s = 2,02$ ohms;

$L_s = 7,4$ mH

Enrolamento principal (rotor):

$R_r' = 4,12$ ohms;

$L_r' = 5,6$ mH

Mutua indutância (enrolamento principal):

$L_{ms} = 0,177$ mH

Enrolamento auxiliar (estator):

$R_S = 7,14$ ohms;

$L_S = 54$ mH

Capacitor de partida:

$R_S = 2,15$ ohms;

$C_s = 255$ μ F

Velocidade de desconexão do capacitor em relação à velocidade síncrona:

$N_r = 75\% \cdot N_s$

2.2. Simulações

2.2.1. Ambiente computacional e descrição das simulações:

Com base no modelo dinâmico da máquina, diversos programas podem ser utilizados para simular o sistema de equações diferenciais que regem a operação do motor monofásico com dois enrolamentos em operação (bifásico). Entre os programas mais utilizados está o conjunto Simulink/Matlab, que tem grande utilização no meio acadêmico e que foi utilizado neste trabalho para a realização das simulações.

O modelo usa um motor assíncrono monofásico com partida a capacitor, disponível na biblioteca do Simulink/Matlab, sendo que serão feitas as devidas adaptações para o objetivo do referido trabalho. A simulação tem o fim de comparar suas características de comportamento e desempenho, tais como corrente, tensão, velocidade e torque.

O motor utilizado nas simulações tem a seguinte especificação: 1/4 HP, 110 V, 60 Hz, 1800 RPM, sendo alimentados por uma fonte de alimentação programada monofásica de 110V.

Na simulação, durante o período inicial, desde que o interruptor seccionador permanece fechado (a partir de $t = 0$ a $t = 0,48$ s), todas as formas de onda são idênticas. Após a abertura do interruptor, as diferenças são observadas como explicado abaixo.

Capacitor de partida - observe as pulsações de torque de 120 Hz, que produzem 120 Hz vibrações mecânicas do rotor e diminuir a eficiência do motor. O pico de torque - peak to ripple, é de cerca de 3 N.m, ou 300% da carga nominal quando o motor está a funcionar sem carga. Observe que o partida a capacitor permanece carregado no seu pico de tensão quando o enrolamento auxiliar é desligado. Após 2s, a carga nominal de 1 N.m é aplicada. Para a obtenção dos dados necessários a análise e comparação do motor monofásico com partida a capacitor, foram realizadas as seguintes simulações, casos 1 e 2, com a ferramenta Simulink/Matlab:

Caso S1: Simulação do motor em condições ideais, com Fonte Senoidal Pura, sem conteúdo harmônico, com tensão de 110 V, frequência nominal, durante 3 segundos;

Caso S2: Simulação do motor, com Fonte Programada, Fonte não senoidal, com conteúdo harmônico, com tensão de 110 V, frequência nominal, durante 3 segundos.

2.2.2. Resultado das simulações do motor

O Modelo a ser utilizado nas simulações será utilizado o modelo da figura 4, onde uma fonte programável alimenta um motor monofásico com partida a capacitor. Nele pode-se constatar, após simulação, o comportamento do motor em relação às grandezas elétricas e mecânicas.

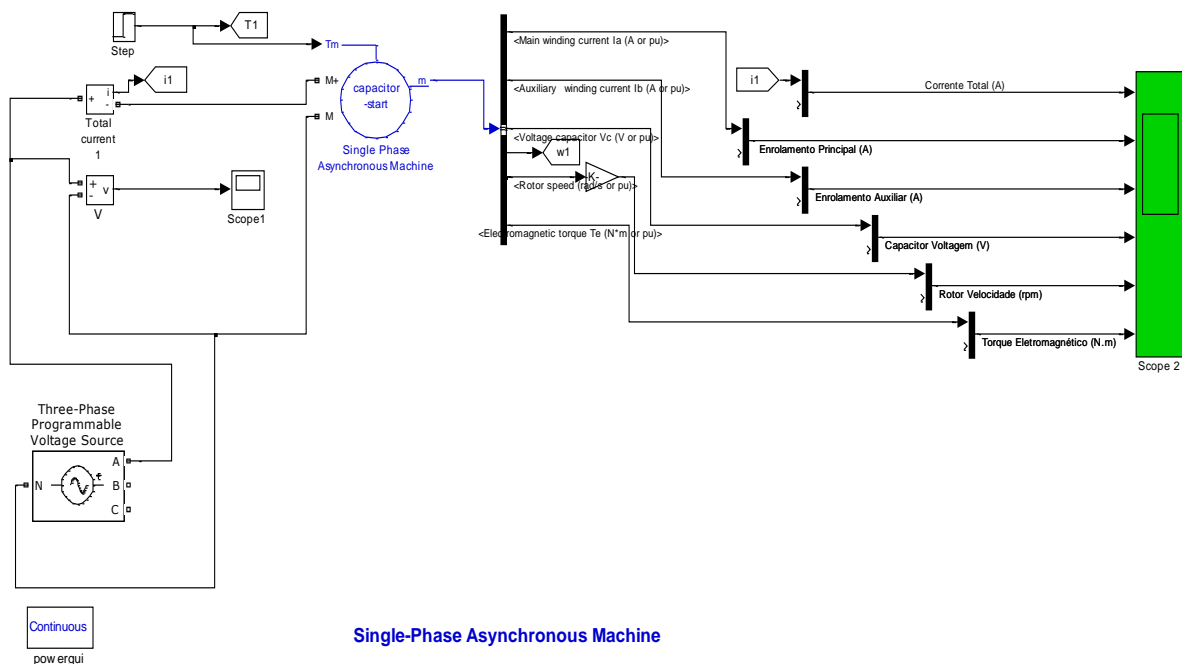


Fig. 4. Modelo do motor monofásico com partida a capacitor em ambiente computacional Simulink/Matlab

Caso 1: Simulação do motor em condições ideais, com Fonte Senoidal Pura, sem conteúdo harmônico, com tensão de 110 V, frequência nominal, durante 3 segundos:

Neste caso, a fonte é senoidal pura, conforme mostra o perfil da simulação na figura 5 abaixo.

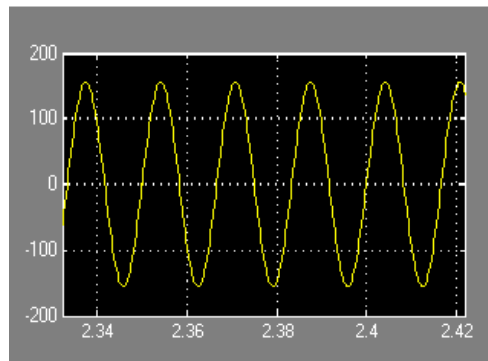


Fig. 5. Fonte senoidal pura

Na sequência, são apresentados os gráficos 6 e 7 da simulação sem conteúdo harmônico:

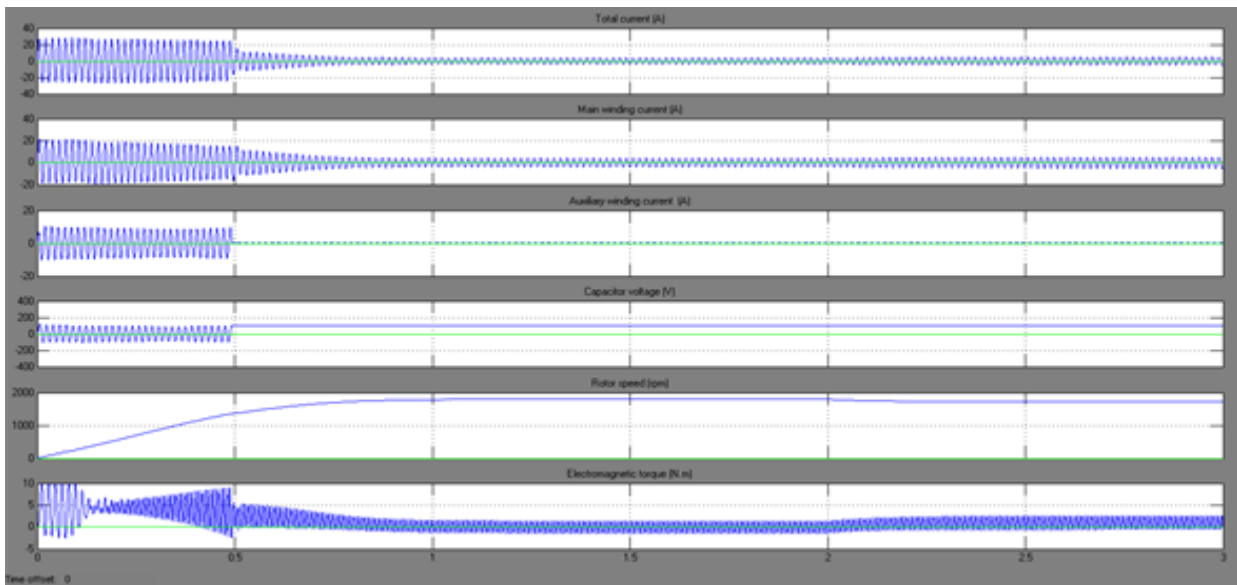


Fig. 6. Caso S1: Gráficos da corrente total, enrolamento principal e auxiliar, tensão no capacitor, velocidade do rotor e conjugado

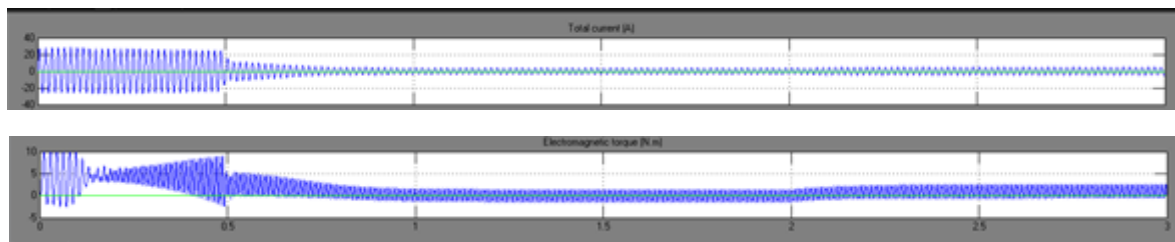


Fig. 7. Caso S1: Gráficos da corrente total e conjugado

Análise do caso S1: Após a simulação, temos que na partida com o capacitor conectado ao circuito do enrolamento auxiliar a corrente de partida e o conjugado atingem valores máximos que se prolonga até o instante $t = 0.48$ s, onde a chave centrífuga é desligada. Após esse instante, e na sequência, com a aplicação de carga nominal, a velocidade se estabiliza em 1720 rpm, com elevação da corrente e conjugado para suprir o acréscimo da carga, no entanto, ambas as grandezas sem distorção harmônica.

Caso S2: Simulação do motor, com Fonte Programada, Fonte não senoidal, com conteúdo harmônico, com tensão de 110 V, frequência nominal, durante 3 segundos:

Neste caso, a fonte é não senoidal, conforme mostra o perfil do modelo de simulação na figura 8:

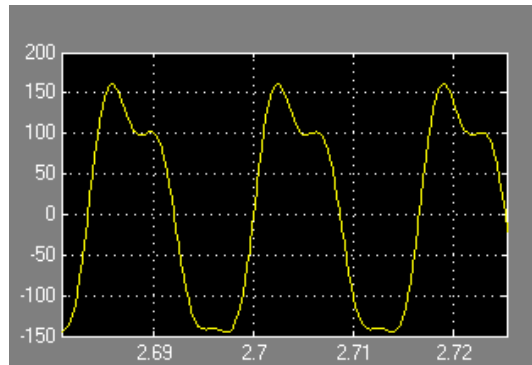


Fig. 9. Fonte não senoidal

Na sequência, são apresentados os gráficos 9 e 10 da simulação com conteúdo harmônico:

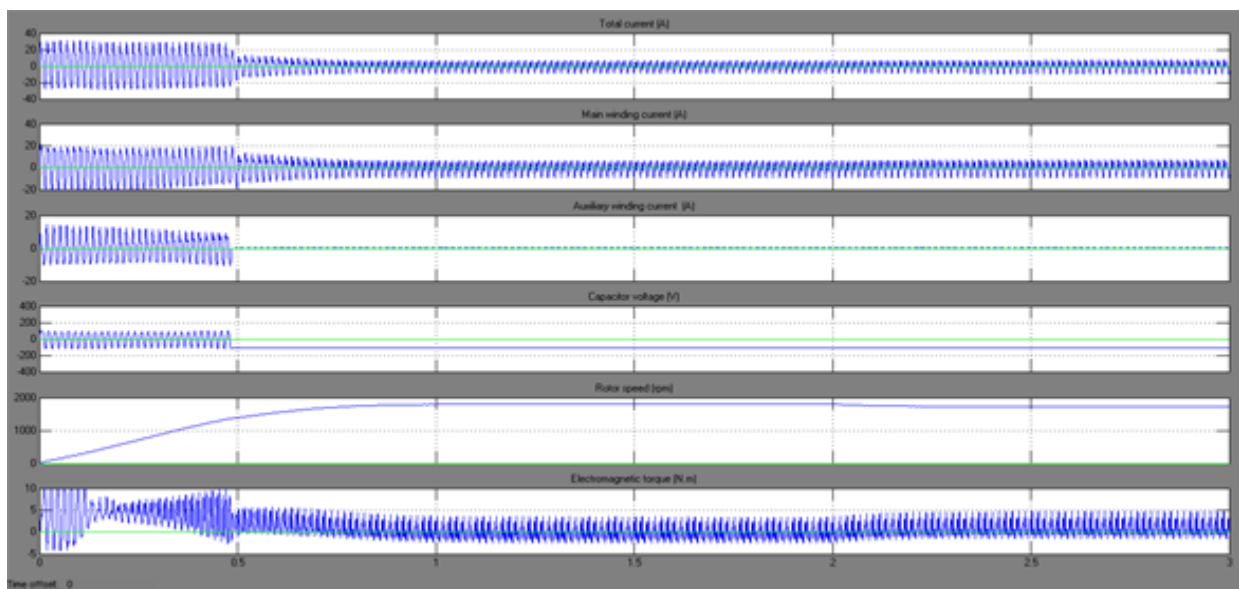


Fig. 9. Caso S2: Gráficos da corrente total, enrolamento principal e auxiliar, tensão no capacitor, velocidade do rotor e conjugado

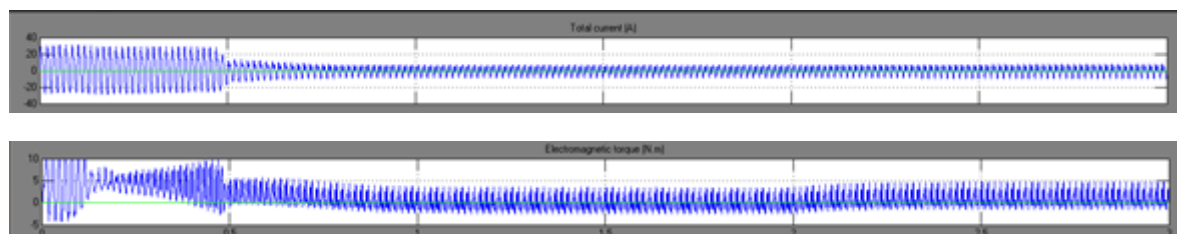


Fig. 10. Caso S2: Gráficos da corrente total e conjugado

Análise do caso S2: Após a simulação, temos que na partida com o capacitor conectado ao circuito do enrolamento auxiliar a corrente de partida e o conjugado atingem valores máximos que se prolonga até o instante $t = 0.48$ s, onde a chave centrífuga é desligada. Após esse instante, e na sequência, com a aplicação de carga nominal, a velocidade se estabiliza em 1720 rpm, com elevação da corrente e conjugado para suprir o acréscimo da carga, destacando que as formas de onda tanto de corrente como de conjugado apresentam-se bastante distorcidas

É importante destacar que o valor corrente e do conjugado em valores totais (peak to peak), na simulação com conteúdo harmônico (caso S2) é maior do que no caso sem distorção harmônica (caso S1);

Comparação dos casos S2 e S1: De um modo geral, a presença de conteúdo harmônico que produz a deformação da forma de onda senoidal das grandezas analisadas trazendo algumas consequências importantes para o motor tais como: aumento do valor das correntes, perdas por aquecimento, diminuição do rendimento diminuição da vida útil do motor, e aumento da pulsação do conjugado.

3.0 - PROJETO DE FILTRO ATIVO

A proposta de filtro ativo tem como objetivo de mitigar os efeitos adversos do conteúdo harmônico sobre o motor monofásico com partida a capacitor. Para tanto, será feita a construção e manipulação de blocos, funções e subsistemas disponíveis na biblioteca do Simulink/Matlab.

Para tanto, o filtro ativo proposto é colocado entre a fonte programável (Grid) e o motor monofásico com partida a capacitor (SPAM), conforme configuração apresentada na figura 11:

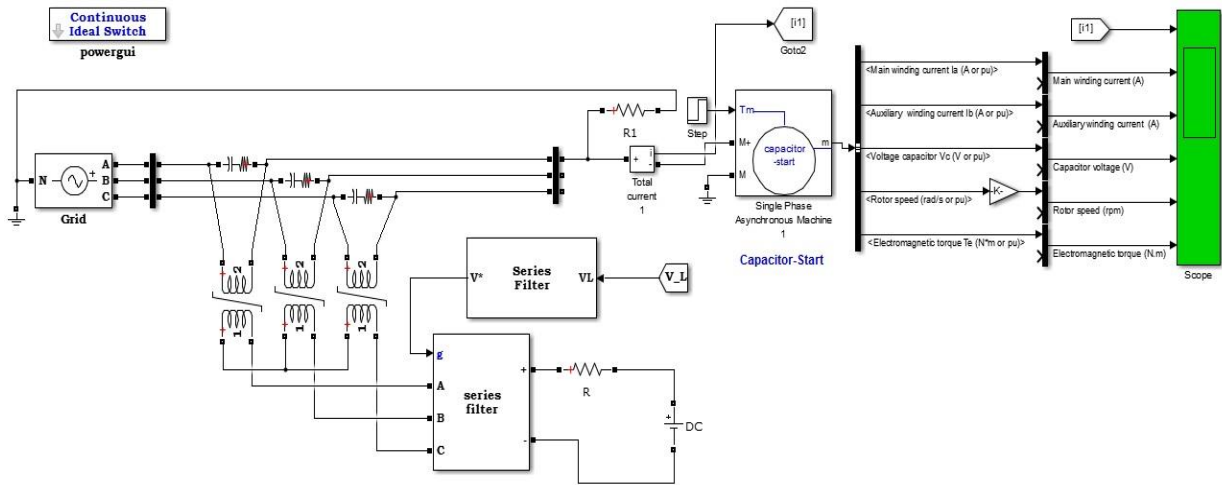


Fig. 11. Modelo de filtro ativo no ambiente computacional Simulink/Matlab - entre a fonte programável e o motor

Resultados:

Após a simulação, os resultados do filtro são apresentados a seguir nas figuras 12 e 13:

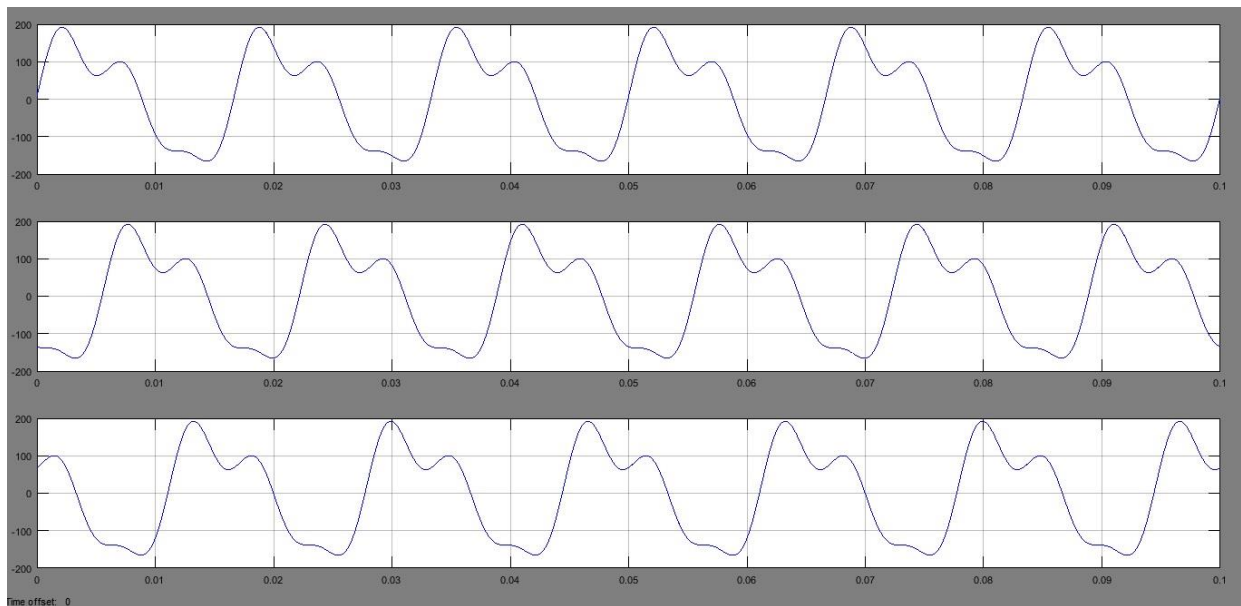


Fig. 12. Tensão no motor antes da inserção do filtro ativo

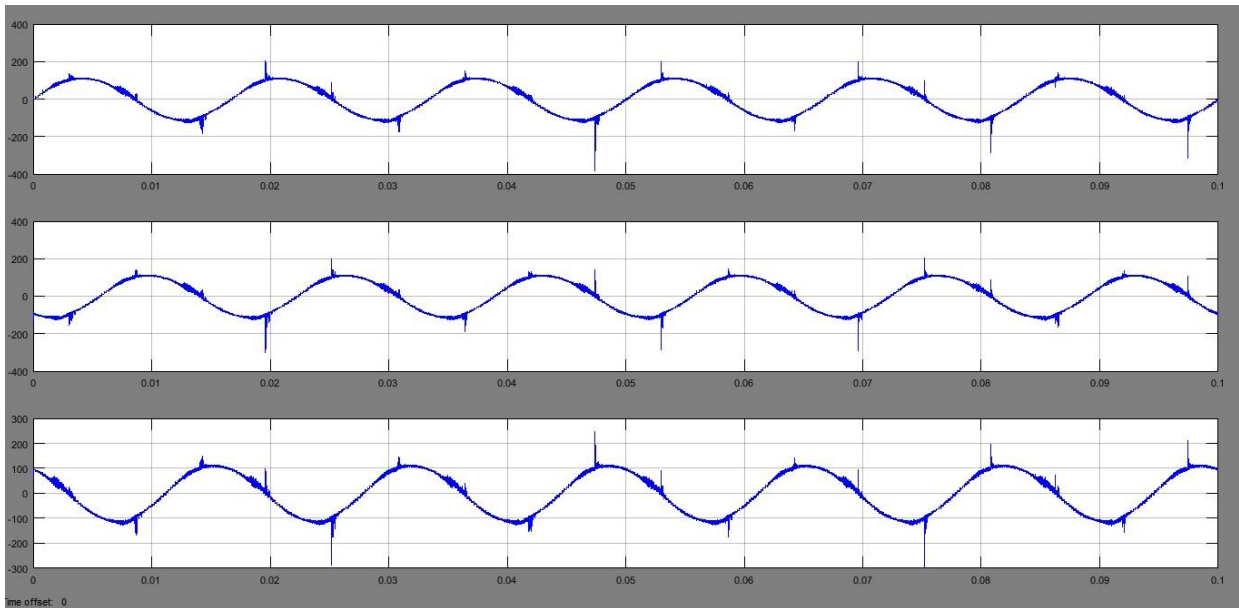


Fig. 13. Tensão no motor após a inserção do filtro ativo

Análise dos resultados da simulação com o filtro ativo proposto:

O resultado das simulações mostrados nas figuras 12 e 13 demonstra claramente que, após a inserção do filtro entre a fonte(Grid) e o motor, a tensão apresenta-se senoidal, portanto, o filtro proposto é adequado e apresenta resultado satisfatório na mitigação da distorção harmônica produzida pela fonte programável.

O desafio seguinte dos estudos é programar o projeto do filtro para ser desenvolvido em laboratório, com baixo custo, relativo às perdas de energia do motor, quando operando sem a presença do filtro.

4.0 - CONCLUSÃO

Após análise detalhada e criteriosa do trabalho, iniciam-se as considerações finais nas quais chegamos as seguintes conclusões:

Nas simulações computacionais com o motor a vazio, e a carga plena, concluímos que: a presença de conteúdo harmônico que produz a deformação da forma de onda senoidal das grandezas analisadas trazendo algumas consequências importantes para o motor tais como: aumento do valor das correntes, perdas por aquecimento, diminuição do rendimento diminuição da vida útil do motor, e aumento da pulsação do conjugado.

A proposta de filtro demonstrou ser bastante satisfatório na mitigação dos efeitos adversos do conteúdo harmônico no motor monofásico com partida a capacitor

O estudo vai continuar no sentido de aprimorar a proposta do filtro ativo, bem como desenvolver, especificar e implementar um filtro de baixo custo que associado ao motor monofásico reduza as perdas de energia, a diminuição de vida útil e ainda evite as pulsações contrárias do conjugado que aumentam a vibração do motor e que travam o eixo.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- (1) Associação Brasileira da Indústria Eletroeletrônica (ABINEE). Relatório anual 2011 - Produção anual dos motores monofásicos.
- (2) BIM, EDSON. Máquinas Elétricas e Acionamento. Editora Elsevier, Campus. 3 a. Ed. Rio de Janeiro, 2014.
- (3) CHAPMAN, STEPHEN. J. Electric Machinery Fundamentals - McGraw-Hill, 1999.
- (4) DEL TORO, VICENTE. Fundamentos de Máquinas Elétricas - Prentice-Hall, 1994.
- (5) D. W. M. CARMEIS, Os Efeitos da Diversidade de Tensões de Distribuição no Setor Elétrico Brasileiro. Estudo de Caso do Refrigerador Doméstico Dissertação de Mestrado Unicamp Campinas – São Paulo 2002.
- (6) FITZGERALD, A. E; KINGSLEY JR, CHARLES; UMANS, STEPHEN D., Máquinas Elétricas: com Introdução Eletrônica de Potência. Editora Bookman, 6ª Edição, 2006.
- (7) GURU, BHAG S. "Electric Machinery and Transformers," Oxford University. Press, 2001
- (8) I. BARBI, Eletrônica de potência: projetos de fontes chaveadas. Ed. do autor, 2007.
- (9) KRAUSE P.C. Simulation of Unsymmetrical 2 – phase Induction Machines, IEEE Transactions on Power Apparatus and Apparatus and Systems .vol. pas-84 .no.11, pp 1025-1037, September, 1965.

- (10) MANCUSSI, Bruno Eduardo Paiva. Pulsção de conjugado em motores monofásicos de capacitor permanente alimentado por tensões não senoidais. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2013.
- (11) R. ERICKSON and D. MAKSIMOVIC, Fundamentals of Power Electronics. Power electronics, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- (12) RIBEIRO, T.N, Uma discussão dos critérios e normas relativas e qualidade da elétrica. Dissertação de Mestrado, PUC, Belo Horizonte – MG, agosto, 1998.
- (13) TAVARES, C.E, modelagem e Análise de desempenho de equipamentos Eletroeletrônicos Diante de distúrbios de qualidade de energia, Uberlândia MG, UFU, Dissertação de Mestrado, maio 2004.
- (14) TOMASELLI, L. C. Estudo De Acionamentos à Velocidade Variável para Motores de Indução Monofásicos com Capacitor Permanente para Aplicação em Ventiladores. Tese de doutorado, UFSC, 2004.
- (15) WONG, Nelson Jue. Acionamentos de motores de indução monofásicos PSC com inversor de frequência aplicado a máquinas de lavar roupas domésticas. Trabalho de Conclusão de Curso. USP São Carlos, 2010

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Erickson Alexandre Rodrigues Barbosa é Engenheiro Eletricista graduado pela Universidade Federal do Pará. Atualmente é professor do Instituto Federal do Pará (IFPA).

André Cavalcante do Nascimento é Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará. Atualmente é Professor do Instituto Federal do Pará (IFPA).

Marcus Ciro Gomes é Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará. Atualmente é Professor do Instituto Federal do Pará (IFPA).

Yago Rezende é Acadêmico do Curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal do Pará (IFPA)