

Controlo de actuadores electromecânicos com incremento de tolerância a defeitos

Dora H. Avelar Gonçalves

José Carlos Quadrado

ISEL-DEETC

ISEL-DEEA

R. Conselheiro Emídio Navarro, 1, 1949-014 Lisboa

Telefone: +351.218.317.180, Fax: +351.218.317.114

Este trabalho descreve um sistema de controlo e um método que permite o funcionamento de um motor eléctrico polifásico com tolerância a defeitos. Convencionalmente a redundância é conseguida à custa de enrolamentos complexos e topologia de inversores. O sistema de controlo proposto usa módulos de potência monofásicos em paralelo para fornecer energia a cada fase. Tirando partido dos circuitos magnéticos isolados e portanto da independência das fases, este sistema de controlo fornece redundância “natural” no caso de falha de fases. O controlador pode detectar um defeito e seleccionar entre modo de correcção sem defeito e com defeito. No modo de correcção com defeito, as correntes para as restantes fases são modificadas de acordo com parâmetros pré-definidos.

Palavras-chave: Controlo, Simulação, Accionamentos.

Introdução

Para um motor eléctrico que executa funções “críticas” é essencial que o motor continue a funcionar, mesmo durante a ocorrência de vários defeitos nos seus componentes. Sistemas de controlo de motores tolerantes a defeitos têm sido estudados por muitos investigadores [1-6]. Contudo a ênfase comum desses estudos tem sido essencialmente projectar enrolamentos mais ou menos complexos, bem como topologias de inversores diversas com ênfase no seu comando e controlo. Duas excepções importantes a esta tendência são consideradas aqui. A primeira é descrita como uma aproximação geral para manter a rotação da força magneto motriz (MMF) normal, na presença de defeitos de fase para um motor de indução de 3,4,5,6 e 7 fases [3]. A segunda refere-se ao processo descritivo para desenho de motores/accionamentos tolerantes a defeitos e compara os méritos entre os motores síncronos de magneto permanente (PMSM) e os motores de relutância (SRM) [6].

Este trabalho introduz um sistema de controlo e um método mais simples aplicado aos motores polifásicos que não necessita de elementos redundantes para continuar a operar após falhas na máquina ou inversor associado. Este sistema de controlo, combinado com o desenho segmentado de motores de magnetos permanentes (PM) polifásicos [7, 8] permite incorporar uma tolerância natural, para defeitos em uma ou mais fases. Além disso, os parâmetros da corrente correspondentes às fases sem defeitos restantes podem ser modificados para melhorar o funcionamento do motor, por exemplo através da minimização de oscilações no binário.

Este trabalho propõe uma nova arquitectura de controlo de fase independente para um motor específico. É também explicada a tolerância natural a defeitos do sistema e a estratégia de correcção para melhorar o funcionamento, em condições de defeito no mesmo. Alguns resultados de simulação

serão apresentados, para ilustrar as variáveis do sistema nas condições: normal, com defeito sem correcção e com defeito corrigido.

Motor Segmentado e Arquitectura de Controlo

A figura 1 ilustra um motor de 7 fases com elementos magnéticos segmentados. O rotor exterior inclui pólos de polaridade magnética alternada, que são distribuídos uniformemente ao longo do anel. O estator ainda inclui vários segmentos de núcleo electromagnético, de construção uniforme, que são distribuídos complanarmente ao longo do entreferro da máquina.

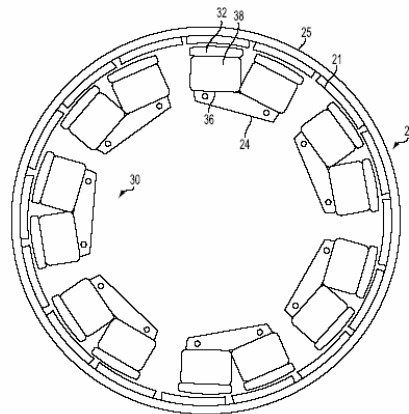


Figura 1. Ilustração de um motor de 7 fases com as componentes do estator segmentadas e um anel exterior de ímãs permanentes

Cada segmento de núcleo inclui uma estrutura magnética em forma de U, que forma dois pólos com superfícies viradas para o entreferro. Cada estrutura de núcleo do electromagneto do estator é separada e isolada magneticamente dos elementos adjacentes. Os elementos do estator são seguros a uma estrutura de suporte não magneticamente permeável, formando por esse meio uma configuração anelar. A configuração do estator minimiza o fluxo de ligação de pólos adjacentes, assim formando unidades de fase do estator consideradas autónomas. Este motor segmentado também torna possível recorrer a uma estrutura de controlo, hardware e software, mais simples, isto é, permitindo o controlo de fase independente, como a que se ilustra na figura 2.

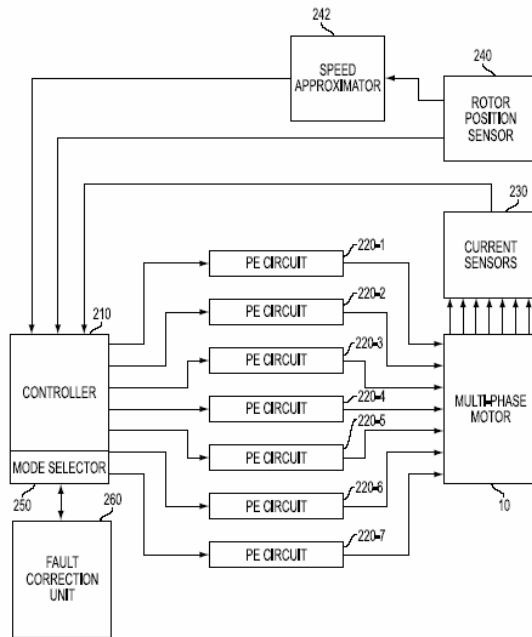


Figura 2. Um diagrama de blocos simplificado, ilustrando o sistema de controlo tolerante a defeitos

A figura 2 representa o diagrama de blocos do sistema de controlo (hardware) tolerante a defeitos, que inclui um controlador e um conjunto de sete circuitos electrónicos de potência para fornecer energia aos sete enrolamentos do estator correspondentes.

A equação básica do circuito do enrolamento de uma fase de um motor polifásico PM é dada por:

$$V_i(t) = E_i(t) + R_i * I(t) + \frac{d}{dt} [L_i(t) * I(t)] \quad i = 1,2,3,\dots,N_s$$

Nesta expressão $V_i(t)$ é a tensão aplicada através do enrolamento, $I_i(t)$ é a corrente de fase, R_i é a resistência do enrolamento, $E_i(t)$ é a força contra-electromotriz aplicada, $L_i(t)$ é a indutância (coeficiente de auto indução) do enrolamento, e N_s é o nº de fases.

Uma malha de controlo independente é formada para cada fase. Se uma destas malhas sofre perturbações devido a um defeito de curto circuito ou de circuito aberto, as malhas restantes ficam ainda operacionais.

Tolerância a Defeitos e Estratégia de Correção

Durante o funcionamento de um motor eléctrico, os defeitos de componentes comuns são as seguintes:

- Um ou mais enrolamentos de fase em circuito aberto
- Um ou mais enrolamentos de fase em curto circuito
- Uma ou mais excitações de fase em circuito aberto
- Uma ou mais excitações de fase em curto circuito

No caso de uma falha de fase por circuito aberto, o controlador pode funcionar num dos seguintes modos de tolerância a defeitos: modo de não correcção e modo de correcção de defeitos. Enquanto que no modo de não correcção, as correntes de fase que se mantêm a funcionar são mantidas inalteradas; no modo de correcção de defeitos as correntes de fase restantes são modificadas de acordo com parâmetros pré-definidos. O software de controlo inibirá a alimentação do circuito correspondente à fase defeituosa.

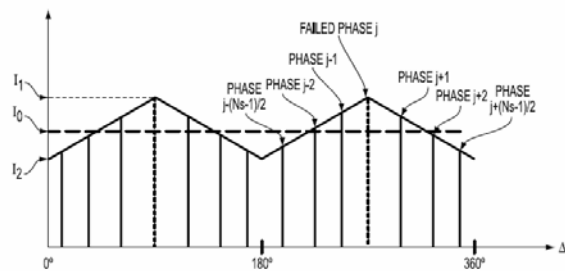


Figura 3 Algoritmo de correcção de defeito único

A figura 3 ilustra um algoritmo de correcção de defeito, que pode ser levado a cabo no modo de operação de correcção de defeitos. O controlador identifica o defeito na fase j , e calcula uma compensação do ângulo de fase ou distância D_{jk} entre o defeito na fase j e cada uma das fases k , ainda operacionais, em que j e k são números inteiros compreendidos entre 1 até N_s , sendo N_s o número de fases do motor. O controlador modifica então as correntes de fase de acordo com parâmetros pré-definidos I_1 e I_2 ; por exemplo o parâmetro I_1 pode representar a amplitude da corrente, da fase correspondente ao defeito j , e o parâmetro I_2 pode representar a amplitude da fase da corrente correspondente a um ângulo de fase deslocado de 90° em relação à fase de defeito j . Matematicamente

$$jI_i = 0, \quad I_k = I_1 - I_2 * D_{jk} \quad k = 1, 2, 3, \dots, N_s, k \neq j$$

Para compensar a produção de binário perdida, e para suavizar as oscilações no binário, o controlador aumenta a amplitude da corrente de fase para uma mais próxima da corrente de fase com defeito j e diminui a amplitude da corrente para uma fase que está mais afastada. Sendo I_0 a amplitude a amplitude da corrente em cada fase, antes da ocorrência do defeito na fase j .

Resultados de Simulação

A figura 4 ilustra a produção de binário total e a contribuição de cada fase, sob várias condições de funcionamento. A f.e.m. aplicada é assumida como sinusoidal. Os gráficos da figura 4 são um exemplo dos resultados de uma excitação sinusoidal aplicada a cada fase.

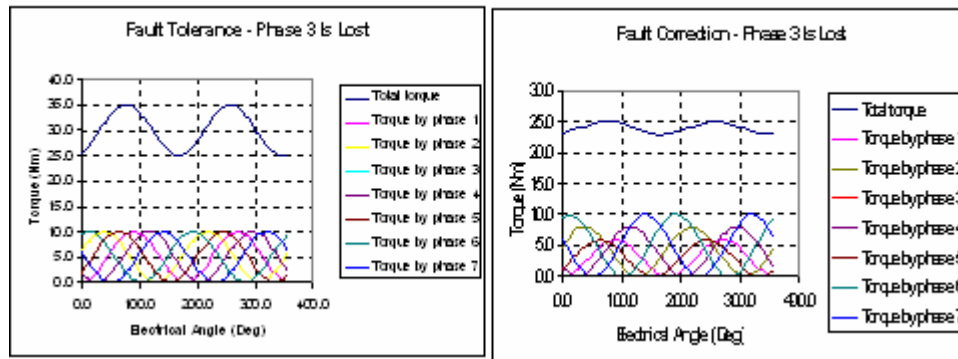


Figura 4 Produção de binário, por fase e total, durante operações de tolerância a falhas e de correcção de defeitos

Conclusões

O isolamento físico, eléctrico e magnético do motor e o projecto do controlador apresentados neste trabalho fornecem redundância “natural” no caso de defeitos de fase. O sistema pode funcionar num modo de tolerância a defeitos, que consiste em não intervir, ou num modo de correcção de defeitos, no qual as correntes das fases restantes são modificadas de acordo com parâmetros pré estabelecidos. Comparando com a configuração convencional do motor trifásico, ligação em estrela, o inversor trifásico de meia ponte, e o método de controlo vectorial, o controlo da fase independente aqui analisado é muito mais indicado para auto-corrigir nas situações de defeitos do motor.

Referências

- [1] B.A. Welchko, T.A. Lipo, T.M. Jahns, S.E. Schulz, *Fault Tolerant Three-Phase AC Motor Drive Topologies: A Comparison of Features, Cost, and Limitations*, IEEE IEMDC, June 1-4, 2003, Madison, WI, USA
- [2] N. Bianchi, S. Bolognani, M Zigliotto, *Analysis of PM Synchronous Motor Drive Failures during Flux Weakening Operation*, Conf. Rec. Power Electronics Specialists Conference (PESC), 1996, vol.2 pp. 1542-1548.
- [3] J. R. Fu and T. A. Lipo, *Disturbance Free Operation of a Multiphase Current Regulated Motor Drive with an Opened Phase*, Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, 1993, pp. 637-644.
- [4] S. Bolognani, M. Zordan, M. Aigliotto, *Experimental Fault-Tolerant Control of a PMSM Drive*, IEEE Trans. Ind. Electronics, vol. 47, 2000, pp. 1134-1141.
- [5] C. B. Jacobina, R. L. A. Ribeiro, A. M. N. Lima, *Fault-Tolerant Reversible AC Motor Drive System*, IEEE Trans. Ind. Applicat. Vol. 39, no 4, 2003, pp. 1077-1084.
- [6] A. G. Jack, B. C. Mecrow, J. A. Haylock, *A Comparative Study of Permanent Magnet and Switch Reluctance Motors for High Performance Fault-Tolerant Applications*, IEEE Trans. Ind. Applicat. Vol.32, 1996, pp.889-895
- [7] B. A. Maslov, A. V. Pyntikov, *Rotary Electric Motor having Magnetically Isolated Stator and Rotor Group*, US Patent N° 6,492,756, December 10, 2002, USA
- [8] R. Harrington, B. A. Maslov, Pyntikov, Z. Soghomonian, *Low-Speed High Torque Brushless PM Motor for Propulsion Applications with an Advanced Magnetic Path Design*, EVS-19, Korea, 2002, pp. 1233-1249