

ANÁLISE DE MODELO PARAMÉTRICO DE OTIMIZAÇÃO DE PROJETO DE MÁQUINA PENTAFÁSICA UTILIZANDO DESIGN DE EXPERIMENTOS

1

AUTORES

Carlos Cardoso da Costa e Silva Júnior¹, Tiago Fouchy Dias²

1,* – Esp., Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, carlos.ccsjr@gmail.com

2,* – Me., Universidade Federal do Pampa - Unipampa

Resumo: O objetivo desse trabalho é validar o modelo parâmetro utilizado para otimizar o projeto de uma máquina elétrica pentafásica através de aplicação de métodos de Design de Experimentos (DoE). É apresentando inicialmente uma breve pesquisa bibliográfica onde são referenciados estudos que utilizam DoE nos processos de projeto, fabricação e estudo de vida útil de máquinas elétricas rotativas. Após é apresentando um caso de análise baseado em um estudo de otimização de projeto de máquina pentafásica, o DoE foi utilizado para avaliar oito variáveis de controle do processo e sua análise possibilitou verificar a significância dos efeitos dos fatores controlados nas variáveis de resposta. Além disso foi sugerido, após as análises de variância individual de cada fator controlado e do modelo de otimização, a redução de três intervalos de variação utilizadas no modelo paramétrico do algoritmo de otimização. A aplicação das reduções de intervalos sugeridas possibilitou a redução do espaço de solução do problema de otimização, sem prejudicar seus resultados e em outra aplicação possibilitou, com o mesmo espaço de solução, encontrar outras respostas pertencentes ao conjunto de soluções do problema multiobjetivo.

Palavras-chave: Design de Experimentos; Planejamento de DoE; Máquina Pentafásica.

INTRODUÇÃO

Os avanços da eletrônica de potência, nesse caso, em específico nos inversores estáticos, tornam cada vez mais viáveis a utilização de máquinas de indução com mais de três fases. Estas máquinas elétricas apresentam uma melhor utilização do material ativo e uma alta relação torque/volume (DIAS, 2016).

Embora as máquinas com mais de três fases apresentem excelentes características quando comparados às máquinas trifásicas, até o momento há um número, relativamente, reduzido de trabalhos que abordam a otimização deste tipo de máquina (DIAS, 2016).

O processo de projeto de máquinas elétricas rotativas envolve diversos parâmetros construtivos que influenciam no seu desempenho e no seu custo final. Com isso um modelo paramétrico que represente satisfatoriamente uma máquina de indução possui um número elevado de fatores controlados, em boa parte devido a dimensões físicas, o que torna grande o espaço de solução para a elaboração de um projeto.

A compreensão dos problemas de design é aprimorada quando o espaço do projeto pode ser explorado de maneira barata e rápida, permitindo o ajuste do número e do intervalo de variáveis do projeto, identificação de restrições ineficazes, equilíbrio de vários objetivos do projeto e otimização (GREENHILL et al., 2020). Segundo Lei et al. (2015) a Análise de Variância (ANOVA) é uma técnica baseada em Design de Experimentos (DoE), que pode ser usada para determinar os fatores significativos de todos os parâmetros de projeto.

A metodologia DoE foi introduzida pela primeira vez na Inglaterra em 1935 por Fisher. A otimização nesse sistema é obtida executando testes através da alteração das variáveis que afetam a resposta do sistema (Maussion, 2017). Os experimentos de triagem podem identificar subconjuntos de variáveis importantes a serem investigadas posteriormente em mais detalhes. A otimização é importante na maioria das aplicações industriais, e geralmente há vários objetivos que devem ser equilibrados, incluindo rendimento, robustez e custo (GREENHILL et al., 2020).

Este trabalho tem o objetivo de aplicar metodologias de DoE no projeto de máquinas elétricas e de analisar o modelo paramétrico de máquina pentafásica, utilizado por Dias (2016), através de ANOVA para determinar a significância de fatores controlados.

METODOLOGIA

O estudo de Dias (2016) tem o objetivo de otimizar o projeto de um motor de indução pentafásico, para isto é desenvolvido um algoritmo de otimização multiobjetivo baseado em uma metodologia de algoritmo genético multiobjetivo. A motivação para a utilização de um método heurístico é apoiado na sua capacidade de solução do problema de otimização com uma busca em apenas uma pequena parcela do espaço de solução do problema, que no caso de estudo é de cerca de $2,12 \times 10^{15}$, considerando os intervalos de cada parâmetro. Desta forma a metodologia proposta resulta em uma redução do custo computacional para a solução do problema de projeto da máquina.

O modelo paramétrico apresentado possui quatorze variáveis de entrada e oito variáveis de saída. As funções objetivo do problema de otimização consideram três variáveis de saída para estabelecer os valores de adaptação e as outras cinco variáveis de saída são utilizadas como restrições do problema. Neste formato o método de otimização busca obter os parâmetros de modo a minimizar o custo da máquina, maximizar o seu desempenho e mantendo variáveis como o torque, dentro de limites estabelecidos.

Para estabelecer o custo da máquina são consideradas duas variáveis de saída, o volume de cobre e o volume de alumínio, onde o objetivo é reduzir os seus valores. Para a determinação do desempenho da máquina é considerada a variável de saída rendimento, cujo ideal é o valor mais próximo de 1.

Foi implementado um projeto de experimentos para avaliar inicialmente oito parâmetros de projeto do motor de indução pentafásico, estas variáveis foram selecionadas a partir dos resultados obtidos em no modelo de otimização original, onde foram observadas as variáveis que sofreram variação no conjunto de resultados considerados ótimos. Os outros seis parâmetros de projetos não

analisados foram considerados como fatores constantes, fixados nos valores encontrados nos resultados ótimos.

Na tabela I são apresentados os fatores controlados, seu número de níveis, valores mínimos e valores máximos. A partir do número de níveis definidos para cada fator controlado a matriz experimental obtida, para um projeto totalmente cruzado, possui um total de 1944 tratamentos.

Tabela 1: Fatores Controlados.

| Variável Controlada | Número de níveis | Valor mínimo | Valor máximo | Fator Controlado |
|--|------------------|--------------|--------------|------------------|
| Altura relativa da ranhura do estator na região que contém os condutores em relação a distância disponível no estator (p.u.) | 2 | 0,50 | 0,60 | A |
| Largura relativa da ranhura do estator em relação ao passo de ranhura do estator (p.u.) | 3 | 0,36 | 0,44 | B |
| Altura relativa da ranhura do rotor na região onde existe condutores em relação a distância disponível no rotor (p.u.) | 2 | 0,45 | 0,50 | C |
| Largura relativa da ranhura do rotor em relação ao passo de ranhura do rotor (p.u.) | 3 | 0,32 | 0,48 | D |
| Indução máxima no entreferro a vazio (T) | 3 | 0,725 | 0,900 | E |
| Largura do anel de curto-circuito (mm) | 2 | 5 | 7 | F |
| Altura relativa do anel do rotor considerando a altura do rotor (p.u.) | 3 | 0,4 | 1,0 | G |
| Relação entre componente de terceira harmônica e componente fundamental da indução do entreferro (p.u.) | 3 | 0,04 | 0,14 | H |

Inicialmente foram realizadas as análises de significância dos efeitos dos oito fatores controlados em quatro variáveis de resposta. Após identificados em quais variáveis de resposta os fatores controlados possuem efeito significativo foram realizadas análises do tipo One-way ANOVA e avaliados se os comportamentos das variáveis de resposta em relação a variação dos fatores controlados possuíam comportamentos conflitantes entre si. Com isso verificou-se a relevância dos intervalos dos parâmetros do modelo de otimização

multiobjetivo proposto inicialmente e a possibilidade, ou necessidade, de alterações nesses intervalos.

5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Das 1944 amostras obtidas, 153 violaram restrições do modelo paramétrica e foram descartadas da análise. Os resultados obtidos mostraram que todos os fatores controlados possuem efeito sobre alguma variável de resposta, mas que nem todos os fatores possuem efeito significativo, considerando uma significância de 0,05, sobre todas as variáveis de resposta.

As análises individuais de cada um dos fatores controlados mostraram que os fatores B, F e G apresentam efeitos significativos, e conflitantes para otimização, nas variáveis de resposta. Da mesma forma se mostra relevante as análises de todos os intervalos proposto no modelo inicial para estas três variáveis.

Já na análise dos intervalos dos fatores E e H mostram que os valores ótimos das variáveis de resposta afetadas estão em uma mesma região de cada intervalo, no entanto realizando uma análise mais aprofundada do modelo de otimização, para parâmetros que minimizam o volume de material ativo, valores muito baixos destes fatores controlados causam violações de restrições do modelo, desta forma não é possível reduzir estes intervalos sem causar prejuízos para os resultados.

Em relação aos fatores controlados A, C e D foram encontradas regiões nos limites dos intervalos, propostos pelo modelo inicial, onde nenhuma das variáveis de resposta, afetadas por estes parâmetros, apresentou pontos ótimos. A análise mais aprofundada, de cada um dos parâmetros, não apresentou problemas quanto a violação de restrições com a redução dos

intervalos analisados. Desta forma verificou-se a possibilidade de redução destes intervalos, sem prejuízos aos resultados do modelo de otimização.

Com base nas análises realizadas foram realizadas duas alterações no modelo de otimização inicial, a primeira sendo a alteração dos limites dos intervalos dos fatores controlados, A, C e D e a segunda sendo a alteração do diferencial entre os níveis dos mesmos fatores controlados.

Como esperado a primeira ação de redução do tamanho dos intervalos não gerou nenhuma alteração no resultado do algoritmo de otimização, apenas reduziu o espaço de solução de $2,12 \times 10^{15}$ para $7,18 \times 10^{14}$, uma redução de mais de 29 vezes.

Já a segunda alteração proposta, que manteve o espaço de solução, mas reduziu o diferencial entre os níveis, apresentou uma ligeira melhora nos valores de adaptação, apresentando novas soluções pertencentes ao centro da fronteira de Pareto da função multiobjetivo do modelo de otimização

CONCLUSÃO

A utilização de projetos de DoE possibilita identificar os efeitos dos fatores controlados e é uma ferramenta poderosa para análise e validação de modelos. Em relação ao caso analisado foi possível verificar a conformidade e significâncias de todos os fatores definidos como controlados para o modelo de otimização multiobjetivo proposto por Dias (2016).

Através da análise dos fatores controlados foi possível propor melhorias ao modelo estudado sem prejudicar seus resultados, mas reduzindo o espaço de solução do problema. Esta redução do espaço de busca resulta na redução do esforço computacional necessário para encontrar as soluções ótimas do problema, que inclusive é uma das principais justificativas para a utilização de métodos de otimização heurística.

Por fim, com as alterações propostas nos limites dos intervalos de busca, do modelo proposto por Dias (2016), foi possível encontrar novas soluções ótimas com o mesmo esforço computacional.

7

REFERÊNCIAS

DIAS, T. F. **Otimização Multiobjetivo de uma Máquina Pentafásica Utilizando NSGA-II**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - PPGEE, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

GREENHILL, S.; RANA, S.; GUPTA, S.; VELLANKI, P; VENKATESH, S. Bayesian Optimization for Adaptive Experimental Design: A Review. **IEEE Access**, vol. 8, pp. 13937-13948, 2020.

LEI, G.; LIU, C.; ZHU, J.; GUO, Y. Techniques for Multilevel Design Optimization of Permanent Magnet Motors. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, vol. 30, no. 4, pp. 1574-1584, dez. 2015.

MAUSSION, P. Design of Experiments in electrical engineering: Applications in control and modeling. **2017 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)**, Nottingham, 2017, pp. 179-186.